

### **Conselleria d'Infraestructures i Transport**

*CORRECCIÓ d'errades de l'Orde de 28 de novembre de 2008, de la Conselleria d'Infraestructures i Transport, per la qual s'aprova la norma de seccions de ferm de la Comunitat Valenciana. [2009/332]*

S'ha observat una errada en la publicació de l'orde esmentada (DOCV núm. 5930, de 12.01.2009), que consisteix a que els annexos no es visualitzen de manera adequada, per la qual cosa es reproduïxen correctament tot seguit.

### **Conselleria de Infraestructuras y Transporte**

*CORRECCIÓN de errores de la Orden de 28 de noviembre de 2008, de la Conselleria d'Infraestructures i Transport, por la que se aprueba la norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana. [2009/332]*

Se ha observado un error en la publicación de la citada orden (DOCV núm. 5930, de 12.01.2009), que consiste en que los anexos no se visualizan de manera adecuada, por lo que se reproducen correctamente a continuación.

## **1 OBJECTE, ÀMBIT D'APLICACIÓ I CONTINGUTS**

Esta norma recull un procediment de disseny de ferms en el qual s'ha articulat el binomi sol·licitació real - resposta estructural i dóna cabuda tant a consideracions teòriques com a altres basades en l'experiència acumulada a la Comunitat Valenciana. Es pretén, en última instància, l'optimització dels recursos destinats a la construcció d'infraestructures viàries.

Esta norma és d'aplicació als projectes de ferms de carreteres de nova construcció i de condicionament de les que hi ha i, tret de justificació en contra, també als de reconstrucció total de ferms. Estes carreteres són les que formen part del sistema viari de la Comunitat Valenciana, amb l'excepció de les vies de titularitat estatal.

La norma no és aplicable als paviments sobre ponts ni en túnels. Tampoc és aplicable en els projectes de rehabilitació superficial o estructural dels ferms i paviments de les carreteres en servici, en els quals ha de seguir-se el que estableix la Norma 6.3 IC "Rehabilitació de ferms".

Esta norma únicament és vàlida en els supòsits considerats en cada apartat. En altre cas hauran de justificar-se les solucions adoptades, i mantindre, en la mesura del possible, els principis i les recomanacions que es donen per a garantir una raonable equivalència estructural de les seccions.

En general, no s'admet la construcció del ferm per etapes, tret de casos molt justificats i exclusivament per a les categories de trànsit pesant T31 i T32, sempre que la secció de ferm inicialment construïda siga estructuralment suficient fins a l'execució de la segona etapa i la superfície complisca tots els requisits exigits a les capes de trànsit i als seus materials constituents. En qualsevol cas s'haurà de sol·licitar l'autorització expressa a la Direcció General d'Obres Públiques de la Conselleria d'Infraestructures i Transport.

Juntament amb les especificacions que es recullen en esta norma s'establiran les mesures necessàries per al compliment de la legislació que en matèria ambiental i de seguretat i salut estiga vigent en cada moment.

En el capítol 2 es presenta el sistema viari del territori de la Comunitat Valenciana, la titularitat del qual es repartixen dos administracions: l'estatal i l'autonòmica. En concret, la xarxa viària autonòmica respon al contingut de l'article 49.14 de l'Estatut d'Autonomia, el qual estableix que la Generalitat té competència exclusiva en les carreteres i camins l'itinerari de les quals transcórrega íntegrament en el territori de la Comunitat. L'aplicació de les disposicions de la norma de seccions de ferm de la Comunitat Valenciana se circumscriu al conjunt de les carreteres de titularitat autonòmica, amb independència que siguen gestionades pels ajuntaments, per les diputacions provincials o per la mateixa Generalitat.

El capítol 3, “Paràmetres de dimensionament”, tracta de les sol·licitacions a les quals es troba sotmés el ferm al llarg de la seua vida útil, de la caracterització del seu fonament i d’algunes singularitats que pogueren derivar-se de la seua ubicació en zones climàtiques determinades. Cal destacar que es consideren les accions derivades del trànsit pesant d’una manera més exacta que en la norma del Ministeri de Foment, i es propugna l’obtenció dels espectres reals de càrregues i s’expressa en qualsevol cas el trànsit pesant en eixos equivalents de 128 kN acumulats durant el període de projecte. Tanmateix, en absència d’estudis específics es permet la valoració del trànsit pesant com en la Norma 6.1 IC; no obstant això, s’establixen, depenent de la qualitat de la informació obtinguda en cada cas, augments o disminucions de l’espessor de la capa estructural de la secció de ferm projectada respecte de la indicada en el catàleg inclòs com a referència en el present document.

Millorar les possibilitats d’elecció del tipus d’esplanada, amb el rigor tècnic necessari, constituïx l’objectiu primordial de l’apartat dedicat al fonament del ferm. De la mateixa manera que fa la Norma 6.1 IC, es consideren com a esplanades de màxima qualitat les estabilitzades amb ciment (ací denominades E4), però s’introduïx una nova categoria en la qual s’inclouen les formades amb sòls seleccionats d’altres prestacions (esplanades E3), les quals, en la vigent normativa estatal, s’inclouen necessàriament en la categoria E2. També de manera anàloga a com es presenta en la normativa estatal esmentada, per a facilitar la tasca del projectista, es presenta un quadre de formació d’esplanades segons la naturalesa del terreny subjacent i amb la possibilitat d’ús de diferents materials (naturals o estabilitzats).

Els capítols 4 i 5 establixen les directrius que s’han de seguir en el procés de disseny de les seccions de ferm, així com els criteris que s’han tingut en compte en la proposta recollida en el capítol 6. Es definixen els paràmetres de caracterització dels diferents materials, i s’inclouen les funcions de transferència corresponents. Així mateix, es donen les pautes necessàries per a l’obtenció, en els punts més desfavorables en cada cas, de les tensions i deformacions produïdes per les accions corresponents, i s’indica la manera de valorar-les per mitjà de les funcions de transferència esmentades.

Amb el capítol 6 “Seccions de ferm”, es vol posar a disposició del projectista un instrument perquè, una vegada conegut el trànsit pesant i elegida la categoria d’esplanada, pugua tindre una referència immediata de la secció més adequada, segons la disponibilitat i el cost dels materials utilitzables. Amb esta finalitat es presenta un catàleg de seccions de ferm, d’interpretació senzilla i d’estructura semblant que els que s’inclouen en la Norma 6.1 IC.

Acaba la norma amb dos capítols “Vorals” i “Aspectes constructius”, que contenen diverses recomanacions extretes de l’experiència en la construcció de carreteres a la Comunitat Valenciana.

## 2 EL SISTEMA VIARI DE LA COMUNITAT VALENCIANA

La Llei 6/1991 de la Generalitat Valenciana, de 27 de març, de Carreteres de la Comunitat Valenciana, definix el sistema viari de la Comunitat Valenciana com el conjunt de totes la vies de trànsit rodat que transcórreguen pel seu territori, independentment de la seua titularitat i de les seues característiques. En el títol II “Elements del sistema viari” s'establix la classificació funcional del sistema, i s'indica que està integrat per les xarxes següents:

- a) Xarxa de carreteres de l'Estat, composta per les vies que tinguen la dita qualificació legal.
- b) Xarxa bàsica de la Comunitat Valenciana, destinada a unir entre si els nuclis bàsics del sistema d'assentaments, connectar amb la xarxa de carreteres de l'Estat i proporcionar accés a les grans infraestructures del sistema de transports.
- c) Xarxa local de la Comunitat Valenciana, en la qual s'integren les carreteres arreplegades en el catàleg del sistema viari i no incloses en la xarxa bàsica de la Comunitat.
- d) Xarxa de camins de domini públic de la Comunitat Valenciana, composta per totes les vies de titularitat pública susceptibles de trànsit rodat, però no incloses en els apartats anteriors.

Les competències que en matèria de carreteres corresponen a la Generalitat troben el seu marc legal en la Constitució Espanyola de 1978 i en l'Estatut d'Autonomia de la Comunitat Valenciana. Són en estes disposicions en les quals s'empara el Reial Decret 1627/1984, d'1 d'agost, sobre traspassos de funcions i servicis de l'administració de l'Estat a la Comunitat Valenciana en matèria de carreteres (BOE núm. 221, de 14 de setembre de 1984).

La Constitució Espanyola de 1978 estableix que les comunitats autònomes podran assumir competències en matèria d'obres públiques d'interés per a estes en el seu propi territori (article 148.1.4); en matèria de carreteres, sobre aquelles l'itinerari de les quals es desenvolupe íntegrament en el seu territori i, en els mateixos termes, en matèria de transport per carretera (article 148.1.5). L'Estatut d'Autonomia de la Comunitat Valenciana, aprovat per Llei Orgànica 5/1982, d'1 de juliol, i modificat per Llei Orgànica 1/2006, de 10 d'abril, estableix que la Generalitat té competència exclusiva sobre les obres públiques que no tinguen qualificació legal d'interés general de l'Estat o la realització de les quals no afecte una altra comunitat autònoma (article 49.13), i sobre les carreteres i camins l'itinerari dels quals transcórrega íntegrament en el territori de la Comunitat Valenciana (article 31.14).

Sobre les bases d'estes previsions constitucionals i estatutàries van ser transferides a la Generalitat determinades funcions i servicis de l'administració de l'Estat en matèria de carreteres per mitjà del Reial Decret 1627/1984, d'1 d'agost, i, en concret, l'administració i la gestió de les carreteres que passen a ser titularitat de la Comunitat Autònoma, i les funcions

que la Llei 51/1974, de Carreteres, atribueix als òrgans de l'administració de l'Estat: la facultat de projectar, construir, conservar i explotar noves carreteres. Segons este decret de transferències es consideren en la xarxa, fins llavors administrada pel Ministeri d'Obres Públiques i Urbanisme, dos categories:

1. Carreteres estatals: totes les que es troben integrades en itineraris d'interés general de l'Estat, i es definixen com a tals les següents:
  - Els itineraris de trànsit internacional, inclosos en els corresponents convenis.
  - Els itineraris d'accés als principals passos fronterers.
  - Els itineraris d'accés als ports d'interés general de l'Estat i als aeroports d'interés general servits per línies regulars de trànsit.
  - Els itineraris d'enllaç entre les comunitats autònomes peninsulars, a través dels principals nuclis de població del territori de l'Estat, que formen una xarxa contínua.
2. Carreteres de titularitat autonòmica: aquelles l'itinerari de les quals es desenvolupa íntegrament en el territori de la Comunitat Valenciana i no formen part dels itineraris d'interés general de l'Estat.

La taula 1 arreplega la distribució per províncies i per titularitat de les carreteres de la Comunitat Valenciana.

**Taula 1. Longitud de les carreteres de la Comunitat Valenciana [km]**

	Estat	Generalitat	Diputacions	Total
Castelló	407	1 022	698	2.127
València	816	825	1.937	3.578
Alacant	650	1.064	1.005	2.719
<b>Total</b>	<b>1.873</b>	<b>2.911</b>	<b>3.640</b>	<b>8.424</b>

En termes de densitat de xarxa (longitud de xarxa / superfície), el major coeficient correspon a Alacant (0,4669), mentre que València i Castelló tenen xifres pràcticament idèntiques: 0,3308 i 0,3204), respectivament (taula 2). Les ràtios longitud de xarxa / nombre d'habitants s'indiquen en la taula 3.

**Taula 2. Densitat de les xarxes viàries de la Comunitat Valenciana [km/km<sup>2</sup>]**

	Estat	Generalitat	Diputacions	Total
Castelló	0,0613	0,1539	0,1052	0,3204
València	0,0755	0,0763	0,1791	0,3308
Alacant	0,1117	0,1827	0,1726	0,4669
<b>Total</b>	<b>0,0805</b>	<b>0,1250</b>	<b>0,1564</b>	<b>0,3619</b>

**Taula 3. Longitud de les xarxes viàries per nombre d'habitants a la Comunitat Valenciana [km/habitant]**

	Longitud de xarxa	Nre. habitants	Ràtio
Castelló	2.127	573.282	0,00371
València	3.578	2.486.483	0,00144
Alacant	2.719	1.825.264	0,00149
<b>Total</b>	<b>8.424</b>	<b>4.885.029</b>	<b>0,00172</b>

A més de les xarxes de carreteres arreplegades en les taules 1, 2 i 3, alguns camins preparats i conservats per diverses administracions (locals, agràries, etc.) servixen de suport a determinats trànsits interurbans que a vegades arriben a ser apreciables.

La xarxa estatal de la Comunitat Valenciana connecta esta amb les comunitats veïnes de Catalunya, Aragó, Castella-la Manxa i Múrcia. A més, hi ha trams la finalitat dels quals consistix a proporcionar els principals accessos als ports d'interés general de l'Estat: per exemple, la V-30, que comunica la A-7 amb el port de València. Les carreteres que conformen la xarxa estatal en el territori de la Comunitat Valenciana s'arrepleguen en la taula 4.

La xarxa autonòmica té una longitud total de 6.551 km, i està gestionada per la Generalitat i per les tres diputacions provincials. Jeràrquicament, s'estructura en dos categories:

- Xarxa bàsica.
- Xarxa local.

amb 944 i 5.605 km, respectivament.

Els principals eixos que configuren la xarxa bàsica es detallen en la taula 5A. D'altra banda, les carreteres de la xarxa local que presenten majors intensitats de trànsit es mencionen en la taula 5B. En la taula 6 s'inclou una anàlisi de les carreteres de titularitat autonòmica per rangs d'intensitat mitjana diària de vehicles pesants (IMDP) en el carril de projecte.

**Taula 4. Carreteres de la xarxa de l'Estat a la Comunitat Valenciana**

A-23	A-3	N-IIIa
A-7	A-35	V-11
AP-7	N-220	V-21
CS-22	N-322	V-23
N-225	N-330	V-30
N-225a	N-332	V-31
N-232	N-337	A-31
N-234	N-344	A-70
N-238	N-420	A-77
N-340	N-III	N-325
		N-338

**Taula 5A. Principals carreteres de la xarxa bàsica autonòmica**

Castelló	València	Alacant
CV-10	CV-25	CV-70
CV-11	CV-30	CV-80
CV-12	CV-31	CV-81
CV-13	CV-32	CV-83
CV-14	CV-33	CV-84
CV-15	CV-35	CV-86
CV-16	CV-36	CV-91
CV-17	CV-37	CV-95
CV-18	CV-40	
CV-20	CV-41	
CV-21	CV-42	
CV-25	CV-43	
	CV-50	
	CV-60	
	CV-81	

**Taula 5B. Principals carreteres de la xarxa local autonòmica**

Castelló	València	Alacant
CV-142	CV-310	CV-737
CV-150	CV-315	CV-742
CV-226	CV-320	CV-743
CV-260	CV-336	CV-753
	CV-368	CV-909
	CV-370	
	CV-375	
	CV-405	
	CV-406	
	CV-520	
	CV-680	

**Taula 6. Longitud [%] de xarxa autonòmica per rangs de IMD<sub>p</sub>**

Intensitat mitjana diària de vehicles pesants en el carril de projecte				
	IMD <sub>p</sub> ≥ 2.000	2.000 > IMD <sub>p</sub> ≥ 800	800 > IMD <sub>p</sub> ≥ 500	500 > IMD <sub>p</sub> ≥ 200
%	6,17	17,30	9,50	18,60

Intensitat mitjana diària de vehicles pesants en el carril de projecte				
	200 > IMD <sub>p</sub> ≥ 100	100 > IMD <sub>p</sub> ≥ 50	50 > IMD <sub>p</sub> ≥ 20	IMD <sub>p</sub> < 20
%	11,90	10,90	14,90	10,60

### 3 PARÀMETRES DE DIMENSIONAMENT

El dimensionament d'un ferm requereix el coneixement, entre altres, dels paràmetres següents:

- El trànsit pesant: intensitat, composició, distribució de càrregues i la seua configuració.
- Les característiques del fonament del ferm i, en particular, la seua capacitat de suport.
- Les condicions climàtiques que puguen afectar el comportament del ferm.
- Les característiques dels materials emprats en les distintes capes del ferm.

#### 3.1 Trànsit

La secció de ferm d'una carretera de nova construcció ha d'adequar-se, entre altres paràmetres, al nivell de les sol·licitacions de trànsit pesant previst durant la vida útil establida per a aquella. Als efectes del dimensionament pràctic de la secció de ferm, este nivell de sol·licitacions es representa per mitjà de la denominada "categoria de trànsit pesant" (apartat 3.1.4).

##### 3.1.1 Estudis de trànsit. Nivells d'informació

Per a la determinació de la categoria de trànsit pesant s'emprarà la informació a què es fa referència a continuació, i s'establix, en funció de la seua quantitat, procedència, fiabilitat i actualització, tres nivells de qualitat de la dita informació:

1. **Nivell inferior**, si es disposa únicament:

- D'intensitat mitjana diària de vehicles pesants en el carril de projecte l'any de posada en servici ( $IMD_P$ ).

2. **Nivell mitjà**, si es disposa:

- D'intensitat mitjana diària de vehicles pesants en el carril de projecte l'any de posada en servici ( $IMD_P$ ).
- De coeficient d'agressivitat mitjà del trànsit pesant ( $CAM$ ).

3. **Nivell superior**, si es disposa almenys:

- D'espectre complet del trànsit pesant.
- D'estudi de velocitats de circulació.
- De distribució temporal del trànsit pesant.



En qualsevol dels casos, és preceptiva l'elaboració d'un estudi d'evolució del trànsit pesant, en el qual es preveurà el trànsit induït i el generat en els mesos següents a la posada en servici, especialment en el cas d'obres de duplicació de calçada, així com el que poguera derivar-se d'altres actuacions incloses en el Pla d'Infraestructures Estratègiques de la Comunitat Valenciana (PIE). Si no es disposa de dades concretes sobre l'evolució del trànsit pesant o de la seua assignació als distints carrils de la calçada, s'adoptaran les hipòtesis següents:

- La taxa de creixement del trànsit pesant pot considerar-se constant i igual al valor mitjà de les obtingudes en els últims cinc anys en l'estació d'aforament permanent o de control (primària o secundària) més pròxima a la zona d'estudi i localitzada en el mateix itinerari. Esta mateixa taxa de creixement s'emprarà per a determinar la  $IMD_p$  l'any de posada en servici.
- Pot considerar-se que l'any de posada en servici és el tercer a partir de la data de redacció del projecte.
- En cas de construcció de vies de dos calçades per mitjà de la duplicació d'una carretera convencional, es considerarà l'any de la posada en servici un increment addicional del trànsit pesant del 7%.
- En calçades de dos carrils i amb doble sentit de circulació, incidix sobre cada carril la meitat dels vehicles pesants que circulen per la calçada.
- En calçades de dos carrils per sentit de circulació, incidix sobre el carril exterior la totalitat dels vehicles pesants que circulen per la calçada.
- En calçades de tres o més carrils per sentit de circulació, incidix sobre el carril exterior el 85% dels vehicles pesants que circulen per la calçada.

### 3.1.2 Trànsit equivalent de projecte

El dimensionament de l'estructura del ferm requereix adoptar una càrrega tipus de càlcul; als efectes d'aplicació d'esta norma, es considera com a referència un eix simple amb rodes bessones i càrrega total de 128 kN, amb la configuració necessària definida en l'apartat 5.2.

El trànsit equivalent de projecte ( $TEP_{128kN}$ ) és un concepte aplicable als nivells d'informació mitjà i superior que es definix com el nombre acumulat d'eixos equivalents de 128 kN ( $EE_{128kN}$ ) previst per al carril de projecte durant el període de disseny del ferm. Per al nivell d'informació mitjà, quan no es disposen d'altres dades sobre l'evolució del trànsit pesant, el trànsit equivalent de projecte s'obtindrà a partir de l'expressió:

$$TEP_{128kN} = IMD_P \cdot 365 \cdot CAM \cdot \frac{(1+r)^{VD} - 1}{r}$$

en la qual  $r$  és la taxa de creixement del trànsit pesant (en tant per un),  $VD$  és el període de disseny de la secció de ferm, i  $CAM$  és el coeficient d'agressivitat mitjà del trànsit pesant, definit d'acord amb el que estableix l'apartat 3.1.3.

El període de disseny serà en general diferent per a fermes flexibles i semirígids que per a fermes rígids. Llevat de justificació en contra per part del projectista, el període de disseny serà:

- Fermes flexibles i semirígids: 20 anys.
- Fermes rígids: 30 anys.

En el cas del nivell d'informació superior, per a cada una de les categories de vehicle pesant  $i$  ( $TEP_{128kNi}$ ), es calcularà el nombre d'eixos equivalents de 128 kN acumulats durant el període de projecte per mitjà de l'expressió següent:

$$TEP_{128kNi} = IMD_{Pi} \cdot 365 \cdot CAM_i \cdot \frac{(1+r)^{VD} - 1}{r}$$

en què  $IMD_{Pi}$  representa la intensitat mitjana diària de vehicles pesants de cada categoria considerada  $i$ , en el carril de projecte i en l'any de posada en servici, i  $CAM_i$  representa el coeficient d'agressivitat mitjà corresponent a la dita categoria  $i$ , calculat tal com s'indica en l'apartat 3.1.3. El nombre total d'eixos equivalents de 128 kN acumulats durant el període de disseny de la secció, és a dir, el trànsit equivalent de projecte ( $TEP_{128kN}$ ), d'acord amb el qual s'establirà la categoria de trànsit pesant per al dimensionament del ferm, d'acord amb la taula 9, s'obté com a resultat de l'expressió següent:

$$TEP_{128kN} = \sum TEP_{128kNi}$$

### 3.1.3 Agressivitat del trànsit pesant

L'efecte d'un vehicle pesant sobre el ferm depèn fonamentalment de la configuració dels eixos (simple, doble, triple), de la càrrega de cada eix i del tipus de ferm.

Als efectes del dimensionament de la secció d'un ferm, el coeficient d'agressivitat d'un vehicle pesant es defineix com el nombre d'eixos equivalents de 128 kN que exercixen el mateix dany sobre el ferm que el produït pel conjunt dels seus eixos. El valor mitjà dels coeficients d'agressivitat ( $CA$ ) dels vehicles pesants que circulen sobre una secció de ferm es denomina coeficient d'agressivitat mitjà ( $CAM$ ).

Quan no es dispose de cap informació relativa al coeficient d'agressivitat mitjà (CAM), podran emprar-se els valors genèricament establits per a la xarxa de carreteres de la Comunitat Valenciana, que estan en la taula 7, en funció de la categoria de trànsit pesant i del tipus de ferm.

**Taula 7. Coeficient d'agressivitat mitjà del trànsit pesant (CAM)**

Categoria de trànsit Pesant		T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
Ferm	Flexible	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3
	Semirígid i rígid	1,0	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,4

Per al nivell d'informació superior, a partir de les dades arreplegades en campanyes d'aforament i de pesatge dinàmic s'establirà l'espectre del trànsit pesant previst per a la carretera en qüestió, és a dir, es definirà la composició detallada del trànsit pesant, la disposició, el tipus i la magnitud de les masses dels seus eixos, i la velocitat de pas per l'estació, i es distingirà almenys entre les categories de vehicles següents:

- Vehicles rígids de dos eixos.
- Vehicles rígids de tres eixos.
- Vehicles rígids o articulats de quatre eixos.
- Vehicles articulats de cinc eixos.
- Vehicles articulats o trens de carretera de més de cinc eixos.

A partir d'estes dades, per a cada vehicle pesant considerat individualment, es calcularà el seu coeficient d'agressivitat (CA) com la suma dels eixos equivalents de 128 kN que exercixen el mateix dany sobre el ferm que cada un dels eixos reals corresponents a eixa configuració.

A estos efectes, es considera que un eix simple que suporta un pes total  $P_i$  [kN] exercix sobre el ferm un dany igual al que produiria un nombre d'eixos equivalents de 128 kN donat per l'expressió següent:

$$EE_{128kN} = \left( \frac{P_i}{128} \right)^\alpha$$

Anàlogament, es considera que un eix doble (tàndem) que suporta un pes total  $P_i$  [kN] exercix sobre el ferm un dany igual al que produiria un nombre d'eixos equivalents de 128 kN donat per l'expressió:

$$EE_{128kN} = 1,4 \cdot \left( \frac{P_j/2}{128} \right)^\alpha$$

De la mateixa manera, un eix triple (trídem) que suporta un pes total  $P_k$  [kN] exercix sobre el ferm un dany igual al que produiria un nombre d'eixos equivalents de 128 kN donat per l'expressió:

$$EE_{128kN} = 2,3 \cdot \left( \frac{P_k/3}{128} \right)^\alpha$$

En les relacions anteriors,  $\alpha$  és un exponent que depén del tipus de ferm:

Ferms flexibles:  $\alpha = 4$

Ferms semirígids i rígids:  $\alpha = 8$

Per a cada categoria de vehicle pesant  $i$ , es determinarà el seu coeficient d'agressivitat mitjà ( $CAMI$ ), com la mitjana dels coeficients d'agressivitat ( $CA$ ) dels vehicles pesants corresponents a la dita categoria.

### 3.1.4 Categories de trànsit pesant

Als efectes d'aplicació d'esta norma es definixen nou categories de trànsit pesant, segons la *IMDP* que es preveja per al carril de projecte l'any de posada en servici per al nivell inferior d'informació, o bé segons el trànsit equivalent de projecte ( $TEP_{128kN}$ ), per als nivells mitjà i superior d'informació.

Les taules 8 i 9 presenten les dites categories de trànsit per als nivells inferior i, mitjà i superior, respectivament.

**Taula 8. Categories de trànsit pesant. Nivell inferior d'informació**

Categoria de trànsit pesant	T00	T0	T1	T21	T22
IMD <sub>P</sub>	≥ 4.000	< 4.000 ≥ 2.000	< 2.000 ≥ 800	< 800 ≥ 500	< 500 ≥ 200

Categoria de trànsit pesant	T31	T32	T41	T42
IMD <sub>P</sub>	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 20	< 20

**Taula 9. Categories de trànsit pesant. Nivells mitjà i superior d'informació**

Categoria de trànsit pesant		T00	T0	T1	T21	T22
TEP <sub>128kN</sub> [10 <sup>6</sup> ]	Flexible	≥ 30,4	< 30,4 ≥ 15,2	< 15,2 ≥ 4,35	< 4,35 ≥ 2,72	< 2,72 ≥ 1,09
	Semirígid	≥ 39,1	< 39,1 ≥ 19,6	< 19,6 ≥ 6,09	< 6,09 ≥ 3,80	< 3,80 ≥ 1,52
	Rígid	≥ 73,7	< 73,7 ≥ 36,8	< 36,8 ≥ 11,5	< 11,5 ≥ 7,16	< 7,16 ≥ 2,87

Categoria de trànsit pesant		T31	T32	T41	T42
TEP <sub>128kN</sub> [10 <sup>6</sup> ]	Flexible	< 1,09 ≥ 0,543	< 0,543 ≥ 0,217	< 0,217 ≥ 0,054	< 0,054
	Semirígid	< 1,52 ≥ 0,761	< 0,761 ≥ 0,272	< 0,272 ≥ 0,109	< 0,109
	Rígid	< 2,87 ≥ 1,43	< 1,43 ≥ 0,512	< 0,512 ≥ 0,164	< 0,164

La taula 9 s'ha obtingut suposant una taxa mitjana anual del creixement del trànsit igual al 4,0%, un període de projecte de 20 anys per als fermos flexibles i semirígid i de 30 anys per als rígids, i els coeficients d'agressivitat mitjans del trànsit pesant indicats en la taula 7.

### 3.2 El fonament del ferm

Es denomina esplanada la superfície de suport del ferm. Per tant, l'esplanada és la part superior del fonament del ferm. Este fonament està constituït en general pels mateixos sòls o la roca de la traça, per un sòl d'aportació o, almenys en la seua part superior, per un sòl estabilitzat *in situ*; ocasionalment, el fonament del ferm pot ser el tauler d'una estructura, encara que esta situació està exclosa de l'objecte d'esta norma.

Tradicionalment s'ha identificat el fonament amb la coronació del reblert o amb la part superior del fons del desmunt, fins a una profunditat de 50 cm. En l'estat actual de la tècnica s'ha de considerar com a part del fonament tot el gruix de materials davall l'esplanada el comportament del qual puga influir en el del ferm. Encara que eixe gruix depén tant de la naturalesa dels materials com de la del ferm, pot admetre's que arriba fins als 2 m.

En la formació de l'esplanada l'objectiu ha de ser aconseguir una superfície:

- amb geometria definida, de manera que el gruix de la capa inferior del ferm puga ser sensiblement uniforme;
- poc sensible als canvis d'humitat;
- amb uns pendents que permeten desaiguar per gravetat el cabal que puga infiltrar-se a través del ferm.
- 

### 3.2.1 Materials naturals

Als efectes de la formació de les esplanades, es consideren sis tipus de materials naturals, segons les característiques definides en l'article 330 del PG-3 del Ministeri de Foment:

M: sòls marginals o inadequats.

0: sòls tolerables (amb CBR  $\geq 3$ ).

1: sòls adequats (amb CBR  $\geq 5$ , excepte quan es disposen en la capa superior de les emprades en la formació de les esplanades, i en este cas hauran de tindre CBR  $\geq 6$ ).

2: sòls seleccionats (amb CBR  $\geq 10$ , excepte quan es disposen en la capa superior de les emprades en la formació de les esplanades de categoria E2, i en este cas hauran de tindre CBR  $\geq 12$ ).

3: sòls seleccionats (amb CBR  $\geq 20$ , excepte quan es disposen en la capa superior de les emprades en la formació de les esplanades de categoria E3, i en este cas hauran de tindre CBR  $\geq 30$ ).

R: Roca.

### 3.2.2 Estabilització de sòls

Als efectes de la formació de les esplanades, es consideren tres tipus de materials estabilitzats, segons les característiques definides en l'article 512 del PG-3 del Ministeri de Foment:

S-EST1: sòls estabilitzats *in situ* amb calç o amb ciment (amb CBR  $\geq 6$  als 7 dies, i un mínim del 2,0% de calç o de ciment).

S-EST2: sòls estabilitzats *in situ* amb calç o amb ciment (amb CBR  $\geq 12$  als 7 dies, i un mínim del 3,0% de calç o de ciment).

S-EST3: sòls estabilitzats *in situ* amb ciment (amb una resistència a compressió simple almenys d'1,5 MPa als 7 dies, i un mínim del 3,0% de ciment).

### 3.2.3 Categories d'esplanada

Als efectes de definir l'estructura del ferm en cada cas, s'establixen quatre categories d'esplanada, denominades respectivament E1, E2, E3 i E4, les quals podran formar-se d'alguna de les maneres definides en l'apartat 3.2.4.

La categoria de l'esplanada es determinarà a partir dels resultats d'assajos d'auscultació de la deflexió per mitjà d'un deflectòmetre d'impacte configurat per a exercir una càrrega de 49 kN sobre una placa de 30 cm de diàmetre, o equivalent en termes de pressió de contacte sobre la superfície.

A partir de les deflexions registrades pel deflectòmetre, es calcularà el mòdul elàstic de superfície del fonament del ferm, que representa la seua rigidesa equivalent, i s'aplicarà l'expressió següent:

$$E_0 = \frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot r \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

en què  $E_0$  és el mòdul elàstic de superfície del ciment del ferm,  $\nu$  és el coeficient de *Poisson* considerat, que depén de la categoria de l'esplanada,  $\sigma_0$  és la pressió aplicada sobre la superfície, i  $d_0$  la deflexió registrada sota el punt d'aplicació de la càrrega.

Les categories de l'esplanada es definiran d'acord amb els valors de referència dels mòduls elàstics de superfície següents:

- E1:  $E_{0,ck} \geq 100$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E2:  $E_{0,ck} \geq 140$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E3:  $E_{0,ck} \geq 255$  MPa;  $\nu = 0,35$
- E4:  $E_{0,ck} \geq 440$  MPa;  $\nu = 0,30$

Els rangs anteriors es referixen al valor característic del mòdul elàstic de superfície  $E_{0,ck}$  obtingut com la mitjana ( $m$ ) menys una vegada la desviació típica ( $s$ ) dels resultats almenys de set assajos en el cas de longituds d'esplanada a avaluar inferiors a 500 m, de deu assajos per a longituds entre 500 i 1.000 m, o del nombre d'assajos que s'obtinga com a resultat de dividir entre 100 la longitud que s'ha d'avaluar quan esta siga superior a 1.000 m, és a dir, realitzant un assaig cada 100 m. Estes longituds han d'entendre's referides a trams de formació o capacitat de suport homogènia de les esplanades, per a la definició del qual han d'emprar-se els mètodes estadístics oportuns a partir dels resultats obtinguts en els assajos.

Per a poder establir la categoria de l'esplanada per mitjà del deflectòmetre d'impacte serà preceptiva l'execució d'un impacte d'assentament, i posterior a este s'hauran d'efectuar almenys dos impactes de 49 kN en cada punt d'assaig, prenent com a valor representatiu la mitjana de les deflexions obtingudes en cada un d'estos, sempre que els seus valors no diferisquen en més d'un 5%; en cas contrari, no podrà considerar-se l'assaig com a vàlid.

Si no hi ha deflectòmetre d'impacte, es podran emprar els mòduls de compressibilitat obtinguts en el segon cicle de càrrega d'assajos de càrrega amb placa definits en la norma NLT-357, amb els valors de referència següents:

- E1:  $E_{v2} \geq 50$  MPa.
- E2:  $E_{v2} \geq 100$  MPa.
- E3:  $E_{v2} \geq 225$  MPa.
- E4:  $E_{v2} \geq 425$  MPa.

### 3.2.4 Formació d'esplanades

En la figura 1 s'arreglen les distintes possibilitats de formació d'esplanades. En la dita figura, el gruix mínim considerat d'un sòl determinat en el terreny subjacent és d'1 m, al qual cal sumar els gruixos dels materials aportats o estabilitzats que s'indiquen explícitament en cada cas.

Les esplanades E1 es podran formar, siga quina siga la naturalesa del terreny subjacent, utilitzant en la part superior del fonament sòls adequats (o millors) amb CBR igual o major de 6 o sòls estabilitzats *in situ* amb calç o amb ciment del tipus S-EST1.

Les esplanades E2 es podran formar, siga quina siga la naturalesa del terreny subjacent, utilitzant en la part superior del fonament sòls seleccionats amb CBR igual o major de 12 o sòls estabilitzats *in situ* amb calç o amb ciment del tipus S-EST2.

Les esplanades E3 es podran formar, sempre que el terreny subjacent estiga format per sòls adequats o materials de millor qualitat, utilitzant en la part superior del fonament sòls seleccionats amb un CBR igual o major de 30.

Les esplanades E4 es podran formar, sempre que el terreny subjacent estiga format per sòls adequats o materials de millor qualitat, utilitzant en la part superior del fonament sòls estabilitzats *in situ* amb ciment del tipus S-EST3.

Si els terrenys subjacents estan constituïts per sòls inadequats, marginals o tolerables, només es podran formar sense restriccions esplanades de categoria E1 o E2.

En les categories d'esplanada E3 i E4, la naturalesa de la capa de subbase estarà condicionada per la naturalesa de l'esplanada: sobre esplanades constituïdes per sòls naturals (E3) només es podran disposar subbases de tot-u, i sobre esplanades estabilitzades (E4) només es podran disposar subbases de sòl ciment, excepte sota paviments de formigó per a categories de trànsit pesant T31 i inferiors.



En les categories d'esplanada E2, la naturalesa de la capa de subbase estarà determinada preferentment per la naturalesa de l'esplanada. Sobre esplanades constituïdes per sòls naturals es disposaran preferentment subbases de tot-u, i sobre esplanades estabilitzades es disposaran preferentment subbases de sòl ciment

En el cas de pedraplens i reblerts tot-u, els materials del nucli i de la transició de les pedraplens, i dels reblerts tot-u sempre que estos satisfacen les exigències de l'article 333 del PG-3, s'assimilaran a un sòl seleccionat tipus 3 (excepte si s'empraren materials marginals en la seua construcció). La coronació, amb un gruix mínim de 50 cm, es realitzarà en principi amb un sòl seleccionat, i s'obtindrà així una esplanada E2 o E3, segons el CBR del dit sòl seleccionat. Per a aconseguir una esplanada E4, haurà d'estabilitzar-se la part superior (S-EST3) en un gruix de 25 cm si s'empren sòls seleccionats del tipus 3, o en 30 cm si s'empren sòls seleccionats del tipus 2. Únicament en este cas d'estabilitzar un gruix de 30 cm es podran emprar en la coronació sòls adequats. Alternativament, es podrà formar també l'esplanada E4 disposant directament sobre la transició un sòl ciment fabricat en central amb un gruix mínim de 15 cm.

Excepte justificació en contra, als efectes de la definició de les seccions de ferm emprant el catàleg inclòs en l'apartat 6.1, s'unificaran les esplanades per la seua categoria, independentment del tipus d'obra de terra subjacent i de les característiques i grossàries dels materials que la formen, de tal manera que no hi haja trams diferenciats en el projecte de longitud inferior a 500 m.


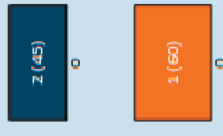
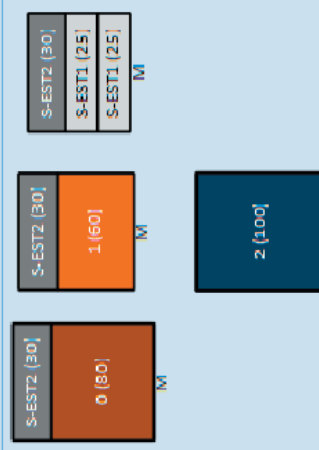








	Sòls marginals o inadequats (M)	Sòls tolerables (0)	Sòls adequats (1)	Sòls seleccionats (2) i (3)	Roca (R)
<b>E1</b>			<p>Gruix mínim de 100 cm</p>		
<b>E2</b>				<p>Gruix mínim de 100 cm (únicament sòls seleccionats 2)</p>	
<b>E3</b>				<p>Gruix mínim de 100 cm (únicament sòls seleccionats 3)</p>	
<b>E4</b>				 	

Figura 1 –Taula de formació d'explanades. Gruix en (cm)

### 3.3 Clima

Les condicions climàtiques de la zona en què s'ubica una carretera afecten el dimensionament del ferm en diferents aspectes, tal com s'indica en l'apartat 5.3, per la qual cosa hauran de ser considerades pel projectista. Cal tindre en compte que encara que la Comunitat Valenciana tinga en general amb un clima benigne, es donen marcats signes de continentalitat en les zones de l'interior, així com notables episodis de pluges torrencials en els mesos de primavera i tardor.

Als efectes del dimensionament del ferm s'han establert a la Comunitat Valenciana quatre zones tèrmiques, en funció de les temperatures ambientals màxima i mínima anuals, i dos zones pluviomètriques, en funció de la precipitació mitjana anual.

**Taula 10. Zones tèrmiques**

Zona tèrmica	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
$T_{MÀX}$	$\leq 28$	$> 28 \text{ i } \leq 32$	$> 28 \text{ i } \leq 32$	$> 32$
$T_{mín}$	$< -6$	$< -6$	$\geq -6$	-

**Taula 11. Zones pluviomètriques**

Zona pluviomètrica	ZP1	ZP2
$P$	$< 600$	$\geq 600$

I és:

- $T_{MÀX}$ : màxima anual de les mitjanes mensuals de les temperatures màximes diàries, en °C, per a un període de mesura continuat de 30 anys.
- $T_{mín}$ : mínima anual de les mitjanes mensuals de les temperatures mínimes diàries, en °C, per a un període de mesura continuat de 30 anys.
- $P$ : precipitació mitjana anual, en mm, per a un període de mesura continuat de 30 anys.

Per a la determinació de les zones tèrmica i pluviomètrica que s'han de considerar s'analitzaran les sèries de dades disponibles en l'estació meteorològica representativa més pròxima. Quan la longitud de la carretera que s'ha de projectar siga tal que hi haja més d'una estació representativa, en cap cas es podrà realitzar una mitjana de les dades d'estes, i és preceptiva la divisió de la carretera en trams, els límits de la qual, als efectes de definició de les zones climàtiques, estaran determinats pels límits d'influència de cada una de les estacions.

Si no es disposa de sèries de dades de les estacions meteorològiques pròximes representatives, o que la dita sèrie de dades no comprega un període mínim de 30 anys, podrà establir-se la classificació de la zona climàtica per mitjà dels mapes genèrics que s'han elaborat per a la Comunitat Valenciana i que s'inclouen en les figures 2 i 3.

Quan la sèrie de dades existisca i comprega un període almenys de 30 anys, però no siga continuada, s'hauran de completar les dades per mitjà de la utilització justificada de les eines estadístiques oportunes. En cap cas es podran completar sèries en què l'absència de dades comprega un període de 5 anys continus.

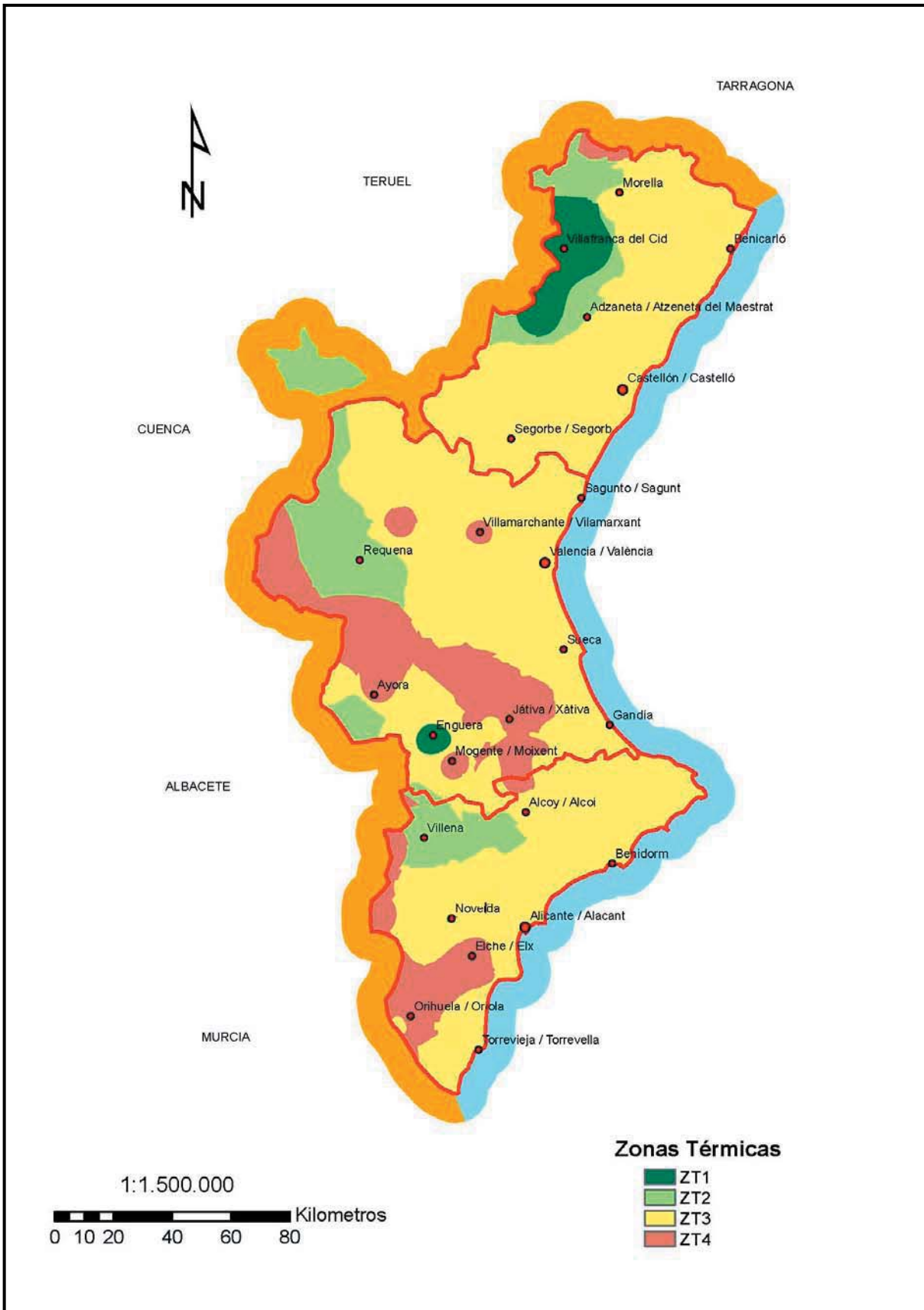


Figura 2 - Zonas tèrmiques de la Comunitat Valenciana

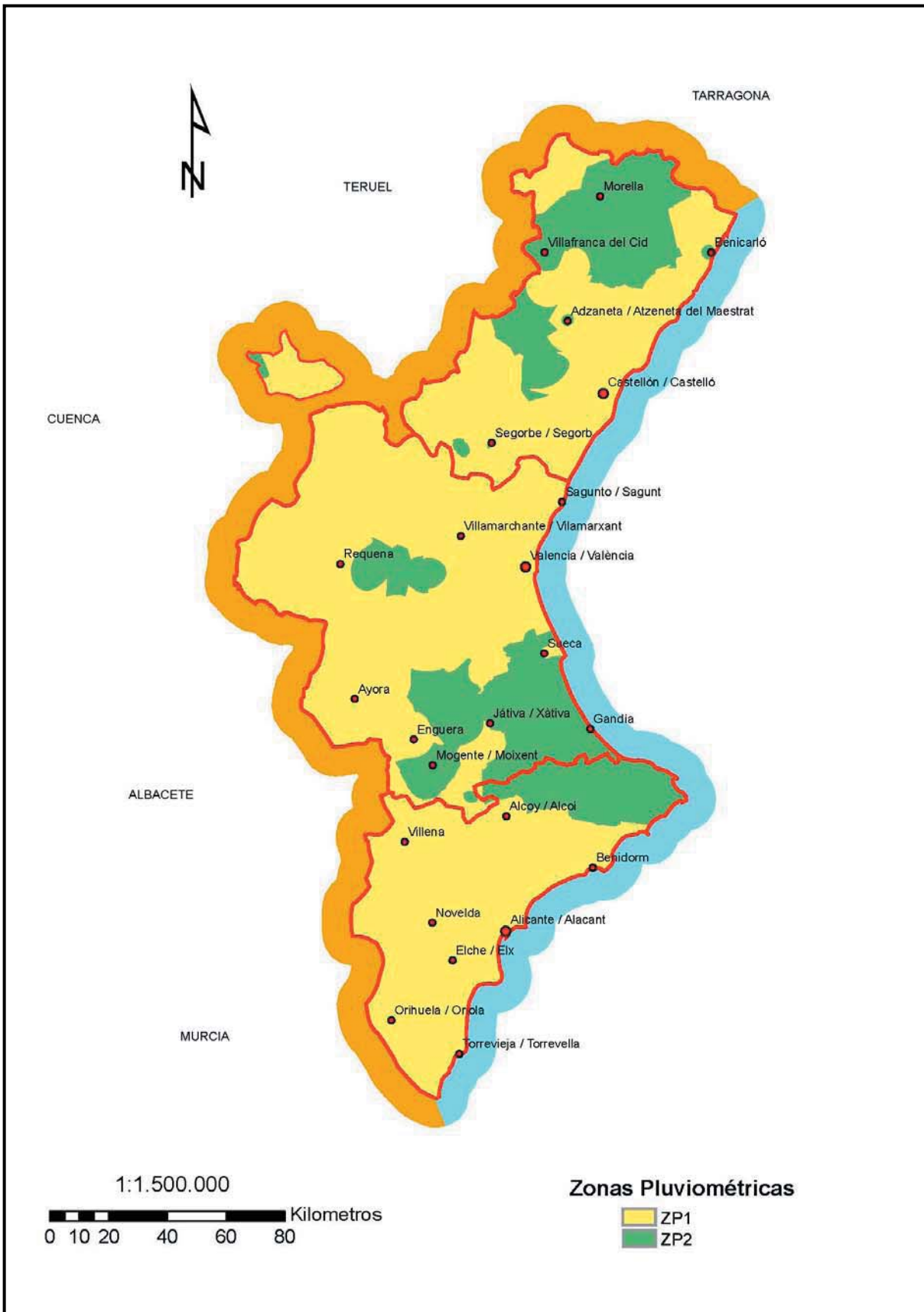


Figura 3 - Zonas pluviométricas de la Comunitat Valenciana

## 4 TÈCNiques DE DIMENSIONAMENT

El dimensionament o disseny estructural del ferm és una part dels estudis tècnics que cal escometre en la redacció d'un projecte de carreteres. El dimensionament va més enllà de la simple elecció del gruix de les capes que componen la secció estructural: les exigències relatives als materials emprats, als processos de posada en obra i al control de qualitat de la unitat d'obra acabada influïxen decisivament en el fet que la capacitat estructural siga la prevista, per la qual cosa hauran de ser tingudes en compte durant tot el procés.

L'enginyer haurà de conèixer amb la major precisió possible tots els factors de disseny: vida útil, sol·licitacions del trànsit pesant, capacitat de suport del fonament del ferm, característiques mecàniques dels materials que formen part de les capes del ferm i condicions climàtiques que poden afectar el seu comportament. A més, hi ha altres factors, no estrictament tècnics, que l'enginyer haurà de valorar (situació geogràfica, econòmica i ambiental de la carretera el ferm de la qual projectarà), ja que poden condicionar algunes decisions en el procés de dimensionament.

El conjunt de qüestions que és necessari analitzar en el dimensionament del ferm es consideraran globalment, ja que en cada una de les fases les decisions que s'adopten poden afectar i condicionar les decisions preses en fases anteriors; per tant, el dimensionament ha de ser plantejat com un procés dinàmicament i permanentment retroalimentat.

Esta norma prioritza el dimensionament del ferm per mitjà de mètodes analítics, la utilització del qual ha d'ajustar-se necessàriament a l'esquema següent:

1. Anàlisi de dades prèvies: estudis anteriors i experiències en la zona d'estudi.
2. Avaluació de condicions del projecte: tècniques, econòmiques, geogràfiques i de qualsevol altra índole que puguen afectar el dimensionament.
3. Predisseny: definició inicial de la secció de ferm basant-se en les conclusions de les anàlisis anteriors, tenint en compte les especificacions i recomanacions sobre gruixos màxims i mínims de les distintes capes.
4. Definició de la capa de trànsit segons els criteris funcionals que siga necessari satisfer.
5. Modelització mecànica de les capes del ferm i del seu fonament, d'acord amb el que estableix l'apartat corresponent d'esta norma.

7. Comprovació de la vida útil del ferm per als tipus de deteriorament considerats, emprant per a això les lleis de fatiga o de deformació apropiades (o les que corresponguen, en cas de considerar altres deterioraments).
8. Anàlisi de sensibilitat dels factors que el projectista considere que la seua dispersió en la posada en obra puga suposar una minva en la capacitat estructural o funcional del ferm: mòduls elàstics, gruixos de capa, resistències a flexotracció dels materials tractats, condicions d'adherència entre les capes, capacitat de suport del fonament del ferm, etc.
9. Ajust de gruixos, d'acord amb criteris constructius o tècnics.
10. Definició de la secció transversal del ferm (realitzant, si fóra necessari, un disseny específic per als vorals), junt amb el seu sistema de drenatge si es requerix.

En els processos de dimensionament o disseny estructural dels fermes, tant si s'empren mètodes empírics com si s'utilitzen mètodes analítics, s'han de distingir dos tipus d'estudis, segons el seu nivell de detall:

- **Estudis preliminars.** El seu objectiu fonamental és estimar el cost total del projecte. En este cas, els estudis geotècnics, de caracterització del fonament, de materials, de trànsit i, en definitiva, tots els necessaris per a la definició detallada del ferm, no estaran encara disponibles, per la qual cosa la secció es dimensionarà, generalment, per analogia amb altres casos semblants.
- **Estudis detallats.** En estos s'han de definir totes i cada una de les característiques tècniques del ferm: fonament, materials i gruixos de les capes, exigències particulars que s'han de plantejar, etc. Estos estudis seran organitzats en les fases següents:
  - definició de trams homogenis,
  - estudi del fonament del ferm i de formació de l'esplanada,
  - disseny pròpiament dit de les possibles seccions estructurals del ferm,
  - anàlisi dels factors que siguen necessaris per a la presa de decisions: condicions locals, anàlisi de costos de construcció i de conservació, etc.

Les qüestions bàsiques que han d'analitzar-se en dur a terme el procés són les següents:

- Qualitat de servici que es pretén donar, amb la qual cosa ineludiblement cal d'abordar el pla de conservació del ferm (desitjablement en el marc d'un sistema de gestió).
- Estratègies d'inversió que puguen estar imposades, i que condicionaran la definició del període de projecte (vida de servici o vida útil).



- Tipus de materials que puguen utilitzar-se en la secció del ferm. Sense excloure que el projectista en pugua considerar altres, els tipus de materials sobre els quals es basa el desenvolupament d'esta norma són els següents:
  - Mescles bituminoses i altres materials tractats amb aglutinants hidrocarbonats.
  - Formigons, formigons magres i altres materials tractats amb conglomerants hidràulics.
  - Materials granulars no tractats.
  - Sòls.

En concret, les seccions que s'inclouen en el catàleg proposat en esta norma (la intenció del qual és la de constituir una referència per al dimensionament analític) es basen en l'ocupació de les unitats d'obra següents:

- Mescles bituminoses.
- Formigons.
- Formigons magres.
- Materials granulars tractats amb ciment.
- Tot-uns artificials.

En tot cas, el projectista podrà justificar l'ocupació de materials diferents (nous o tradicionals) si són avalats pels estudis i anàlisis corresponents que garantisquen un correcte comportament de les seccions de ferm constituïdes amb estos.

El projectista valorarà totes les qüestions d'enginyeria i de construcció involucrades abans d'abordar el disseny del ferm, i relacionarà este amb altres parts del projecte i garantirà la seua compatibilitat amb allò que s'ha establert en estes:

- Geometria de la carretera. Les amplàries dels carrils i dels vorals han de ser coneguts pel projectista del ferm i este ha de tindre en compte les opcions o possibilitats futures d'ampliació de la calçada, la qual cosa pot afectar especialment el dimensionament del voral. D'altra banda, valors elevats del pendent longitudinal són un important aspecte que cal considerar, ja que velocitats baixes del trànsit pesant en les rampes produeixen tensions i deformacions elevades en l'estructura del ferm, les quals requereixen consideracions especials sobre el comportament dels materials.
- Moviments de terres. S'ha de tindre en compte l'avaluació prèvia de la magnitud dels moviments de terres, i valorar la distribució lineal de desmunts i terraplens, així com la seua altura i la naturalesa prevista dels fons de desmunt.
- Arreplegada i drenatge de les aigües que puguen arribar al ferm, bé des de la superfície, bé des de capes freàtiques.
- Consideracions constructives. Els terminis disponibles per a l'execució de les obres poden alterar l'estratègia per a la selecció del tipus de ferm. D'altra banda, les capacitats

i l'experiència dels constructors locals i la disponibilitat de materials de la zona han de ser tingudes en compte, en particular en projectes xicotets.

- Capa de trànsit. A més d'establir la capacitat estructural del ferm i la seua duració prevista, el projectista ha de definir en detall la capa de trànsit, les exigències de la qual dependran de la categoria de la carretera, de la seua geometria, del nivell de càrregues que ha de suportar, del clima de la zona, etc. Els tipus de capes de trànsit que es consideren en esta norma són els següents:
  - Mescles bituminoses drenants.
  - Mescles bituminoses en capes de gruix xicotet.
  - Mescles tipus formigó asfàltic.
  - Regs amb graveta.
  - Lletades bituminoses.
  - Formigons amb distintes tècniques d'acabat superficial.

En tot cas, les característiques superficials mínimes que s'ha d'exigir seran les següents:

- La regularitat superficial (valorada per mitjà de l'IRI).
- La macrotextura (valorada per la MPD o per mitjà de l'altura d'arena, MTD o ETD).
- La resistència al lliscament (valorada per mitjà del CRT o per mitjà del CRL).

## 5 DIRECTRIUS PER AL DIMENSIONAMENT ANALÍTIC

Esta norma pretén proporcionar al projectista les eines necessàries perquè este puga definir, en cada cas particular, la secció de ferm que millor s'adapte a les condicions tècniques, econòmiques, de disponibilitat de materials o de qualsevol altra índole de l'obra considerada. Per això, s'inclouen en este capítol directrius per al dimensionament de les seccions per mitjà de mètodes analítics.

### 5.1 Introducció

Com en tot procés de disseny estructural, per al dimensionament analític dels fermes es requereix:

- Una teoria per a predir els estats de deteriorament o fallada de l'estructura.
- Una caracterització de les propietats dels materials d'acord amb la teoria seleccionada.
- Una forma de determinar les relacions entre les magnituds dels paràmetres per a aconseguir el comportament desitjat.

La teoria que s'assumix en esta norma és la de considerar els fermes com a sistemes multicapa elàstics sotmesos a les accions del trànsit pesant. Per a definir tals sistemes s'adopten els supòsits bàsics (hipòtesi de Burmister) següents:

- Les capes del ferm i si és el cas del fonament són d'amplitud indefinida en el pla horitzontal.
- Les capes tenen un gruix uniforme.
- L'última capa (la inferior de les considerades en el fonament) és infinita en sentit vertical (i es caracteritza com un espai semiindefinit de *Boussinesq*).
- Les distintes capes estan compostes per materials elàstics lineals, homogenis i isòtrops; estos materials es definixen per mitjà del seu mòdul d'elasticitat ( $E$ ) i el seu coeficient de Poisson ( $\nu$ ).

S'accepten, a més, en la modelització les simplificacions següents:

- Cada una de les càrregues que actua sobre el ferm es representa per mitjà d'una pressió distribuïda uniformement sobre una àrea circular en la superfície del paviment.
- Cada capa es recolza sobre la subjacent de forma contínua. El contacte entre les capes pot modelar-se en condicions d'adherència total (igualtat de deformacions horitzontals), parcial o nul·la.
- Es negligixen les forces d'inèrcia i els efectes tèrmics (amb les excepcions que s'indiquen més avant per als paviments de formigó).
- Les deformacions que es produïxen en el sistema són xicotetes, de manera que no alteren les hipòtesis anteriors.

- No es consideren els esforços tallants que es produïxen en les zones de contacte entre les càrregues i la superfície del paviment.
- No es considera la massa pròpia del ferm.

En el cas dels ferms rígids, la presència de juntes (o de les fissures cosides per mitjà de les armadures en els paviments armats continus) fa que en rigor la teoria multicapes no puga ser aplicada en estos. No obstant això, les tensions màximes que s'originen en estos poden ser avaluades amb suficient aproximació aplicant als resultats de l'anàlisi multicapes els coeficients de majoració que s'indiquen més avant.

Amb estes hipòtesis i simplificacions, les equacions en derivades parcials que resulten del plantejament del problema es resolen per mitjà de transformades. La resposta de l'estructura s'obté aleshores en forma d'integrals definides que es resolen numèricament. Per a això, s'utilitzen aplicacions informàtiques de les quals hi ha moltes versions en el mercat (moltes d'estes d'accés gratuït en Internet).

Per a saber si el ferm predissenyat està correctament dimensionat, és a dir, si el gruix de les capes és suficient, es comença determinant l'estat tensional produït per una càrrega tipus. La càrrega tipus es fixa a partir de les regulacions sobre masses dels vehicles pesants i pressions d'unflament dels pneumàtics; a Espanya, la regulació és la que s'estableix en el Reglament General de Vehicles, aprovat per Reial Decret 2822/1998, de 23 de desembre. Als efectes de l'aplicació d'esta norma, es considera que la càrrega màxima per eix simple de referència és de 13 t o 128 kN, i que la pressió màxima d'unflament permesa és de 900 kPa.

A partir dels valors de les tensions i de les deformacions obtingudes en el càlcul es determina el nombre **N<sub>f</sub>** de vegades que el ferm és capaç de suportar l'aplicació de la càrrega tipus per mitjà d'una anàlisi de fatiga o de deformacions. Per a això s'han hagut d'establir prèviament les funcions de transferència (lleis de fatiga o lleis de deformació) dels materials que componen el ferm. El valor de **N<sub>f</sub>** ha de ser superior al nombre **N<sub>t</sub>** d'aplicacions de càrrega previstes durant el període de projecte (és a dir, el trànsit equivalent de projecte), deduides de l'estudi de trànsit corresponent, d'acord amb l'apartat 3.1 d'esta norma.

En l'anàlisi dels ferms rígids, els resultats de l'anàlisi multicapes s'han de majorar per mitjà d'un coeficient que depén del tipus de paviment de formigó. Els valors d'estos coeficients són els que s'indiquen a continuació:

- Paviments de formigó en massa amb juntes sense passadors: 1,75.
- Paviments de formigó en massa amb juntes amb passadors: 1,45.
- Paviments continus de formigó armat: 1,20.

Les esmentades funcions de transferència són expressions matemàtiques obtingudes a partir d'assajos de laboratori i que han de ser calibrades en estudis a escala real, amb les quals es determina el nombre **N<sub>f</sub>** d'aplicacions de la càrrega tipus que pot suportar el

material estudiat abans d'arribar a l'esgotament estructural per fatiga, o al valor límit de deformacions plàstiques acumulades, a partir de certs **paràmetres crítics** que formen part de la resposta del material a la sol·licitació. En la pràctica del disseny estructural dels fermes les dites funcions s'obtenen de la literatura tècnica, llevat que la normativa que s'utilitze prescriba l'ocupació d'unes funcions determinades.

En el dimensionament analític de fermes se sol acceptar el concepte de dany acumulat d'acord amb la hipòtesi de Miner, segons la qual si una capa amb un mòdul d'elasticitat  $E_j$  i un coeficient de Poisson  $\nu_j$  és capaç de suportar  $N_{fij}$  aplicacions de la càrrega tipus  $j$ , la fracció de dany produït per  $n_{ij}$  aplicacions de la dita càrrega serà:

$$d_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_{fij}}$$

de manera que l'esgotament estructural de la capa es produirà quan es verifiqui la igualtat:

$$\sum_{i,j} d_{ij} = 1$$

## 5.2 Càrrega tipus i trànsit de projecte

El coneixement del trànsit de vehicles pesants que sol·licitaran la secció estructural del ferm és fonamental des de dos punts de vista: d'una banda, la categoria de trànsit pesant considerada suposa un criteri per a la definició de les exigències de qualitat que han d'oferir els materials emprats en la construcció del ferm; d'altra banda, el trànsit pesant representa un paràmetre fonamental en l'anàlisi del comportament a fatiga o enfront de deformacions de la secció del ferm.

Als efectes d'establir les exigències als materials que constituïran la secció serà suficient la definició de la categoria de trànsit pesant, d'acord amb el que estableix l'apartat 3.1 d'esta norma, tenint en compte el nivell d'informació de trànsit adoptat. No obstant això, per a dur a terme el càlcul de la secció de ferm, el projectista ha de conèixer el *Trànsit Equivalent de Projecte*, el qual s'expressarà com el nombre d'eixos equivalents de 128 kN que ha de suportar la secció de ferm al llarg de la seua vida de projecte (**TEP<sub>128kN</sub>**), en funció del que estableix l'apartat 3.1 d'esta norma i determinat d'acord amb el nivell d'informació de trànsit adoptat.

Es considera que l'eix equivalent és un eix simple, amb rodes bessones i una càrrega total de 128 kN. Segons el que s'ha exposat més amunt, s'assumix que la càrrega per roda s'aplica sobre una àrea circular i també, amb caràcter general, que la pressió de contacte és igual a la pressió d'unflament del pneumàtic (una cosa que no és exacta, però que oferix una estimació prou aproximada per a utilitzar-la en el càlcul, que queda del costat de la seguretat).

La relació entre el radi de la superfície circular de contacte, la càrrega total per roda i la pressió de contacte és la següent:

$$P = q \cdot \pi \cdot R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{P}{q \cdot \pi}}$$

i és:

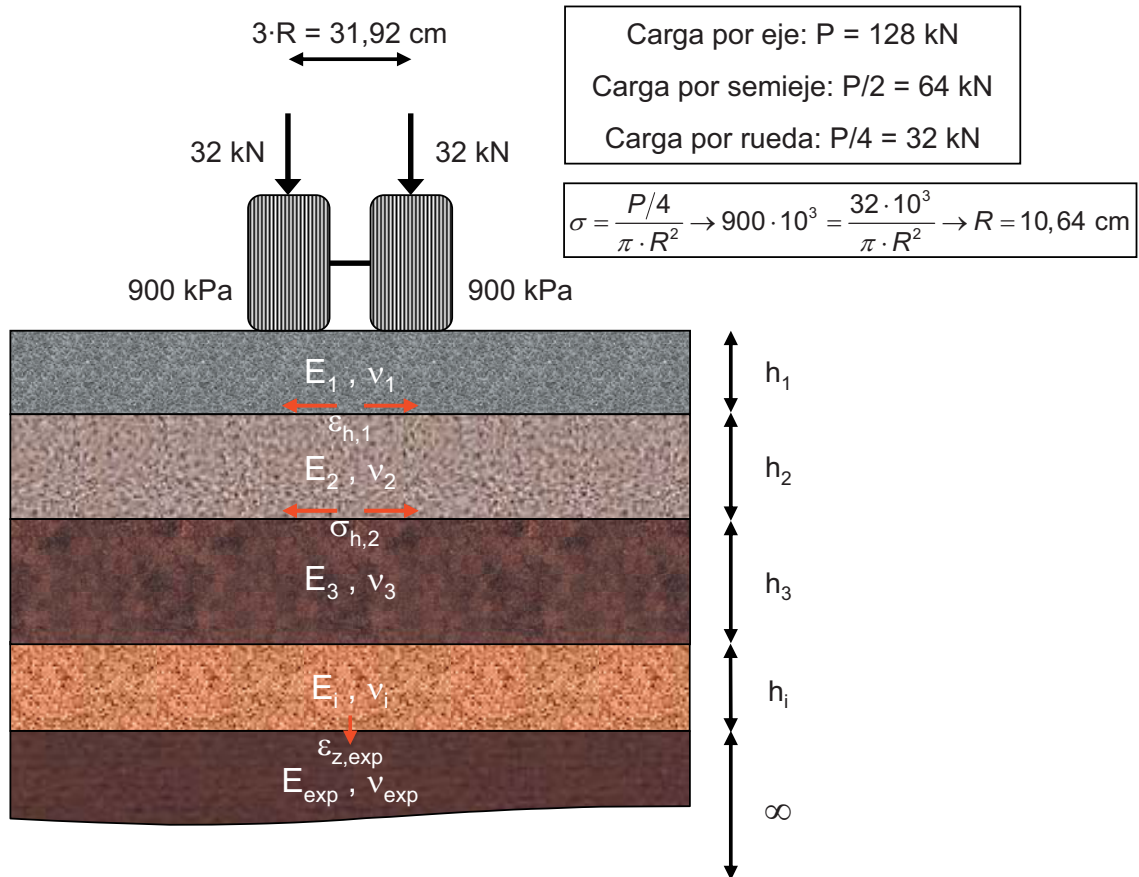
- $P$ : càrrega sobre la roda [N].
- $q$ : pressió de contacte (aproximadament igual a la d'unflament) [Pa].
- $R$ : radi de la superfície circular de contacte [m].

Per a un eix equivalent de 128 kN, es tenen, per tant, els valors següents en cada roda:

- $P = \frac{128.000}{4} = 32.000 \text{ N}$
- $q = 900 \text{ kPa}$
- $R = 10,64 \text{ cm}$

Als efectes de càlcul s'empra una càrrega de dos rodes de 32.000 N cada una, amb una separació entre els seus respectius centres igual a tres radis, és a dir, 31,92 cm (de manera que hi ha una separació entre els cantells interiors d'ambdós rodes igual a un radi, és a dir, 10,64 cm). El punt mitjà d'aplicació de les càrregues està localitzat a una distància de 15,96 cm de cada un dels centres de les rodes, tal com s'indica en la figura 4.

El projectista podrà, quan les configuracions dels vehicles pesants si és el cas particular siguin diferents d'estes, i basant-se en estudis de trànsit degudament justificats, emprar altres valors de càrrega per roda, de pressió d'unflament i de distribució de càrrega. En eixe cas, haurà de justificar adequadament l'adopció d'un nou eix de referència, els valors adoptats del *Coefficient d'Agressivitat Mitjana (CAM)* i l'assignació de la categoria de trànsit pesant corresponent.



**Figura 4. Esquema de càrrega i secció tipus**

### 5.3 Dades climàtiques

D'acord amb el que estableix l'apartat 3.3 d'esta norma, s'haurà de tindre en compte, als efectes del dimensionament de la secció de ferm, en quines zones tèrmica i pluviomètrica se situa l'obra que es projecta, tal com s'indica en l'apartat 6.2.

El projectista haurà de tindre en consideració que la zona tèrmica en què es localitze l'obra afectarà, fonamentalment:

- El mòdul elàstic de càlcul de les mescles bituminoses.
- L'elecció del tipus i característiques exigibles a l'aglutinant bituminós empleat en les mescles bituminoses.

- La distància entre juntes en els paviments de formigó en massa sense passadors en les juntes, i entre fissures induïdes en la prefissuració de capes d'altres materials amb ciment.
- L'adopció de mesures complementàries si les temperatures previstes són molt elevades o molt baixes.

D'altra banda, la zona pluviomètrica en què es localitze l'obra afectarà, fonamentalment, a:

- L'elecció del tipus i característiques exigibles a la capa de trànsit.
- La necessitat, o no, de segellat de les juntes transversals en els paviments de formigó en massa.
- L'adopció de mesures complementàries si són previsibles precipitacions molt intenses o llargs períodes de sequera extrema.

## 5.4 Caracterització dels materials

### 5.4.1 Nivells de qualitat de la informació.

Per a l'establiment dels paràmetres característics dels materials als efectes del càlcul de les seccions de ferm, es consideren tres possibles situacions segons la quantitat i qualitat de les informacions prèvies disponibles:

- **Nivell inferior:** si no es disposa de dades específiques sobre els materials.
- **Nivell mitjà:** si es disposa només de les dades bàsiques sobre els materials: tipus de mesclures bituminoses, resistències exigides als materials tractats amb ciment, etc.
- **Nivell superior:** si es disposa de les dades necessàries per a caracteritzar per complet els materials: composició i formulació de les mesclures bituminoses, tipus d'aglutinant emprat, resistències exigides i previsibles dels formigons i altres materials amb ciment, formació precisa de l'esplanada (i no tan sols la seua categoria), etc.

### 5.4.2 Mòduls elàstics i coeficients de Poisson

D'acord amb les bases del disseny assumides en esta norma, el comportament dels materials emprats en una secció de ferm es considera elàstic i lineal i, per tant, la seua caracterització als efectes de càlcul es durà a terme per mitjà del seu mòdul d'elasticitat ( $E$ ) i el seu coeficient de *Poisson* ( $\nu$ ). Llevat que es dispose d'estudis que aconsellen l'ocupació



d'altres valors diferents, s'utilitzaran els valors que s'inclouen en l'apartat 6.2 d'esta norma. En tot cas, els mòduls elàstics utilitzats en el dimensionament (mòduls elàstics de càlcul) dependran de la zona tèrmica considerada, així com del nivell de qualitat de la informació dels materials:

- En el cas que el nivell d'informació dels materials siga l'inferior, s'empraran en qualsevol cas els valors mitjans ( $E_{MED}$ ) indicats en l'apartat 6.2.; en el cas de les mescles bituminoses, estos valors mitjans hauran de corregir-se, tal com s'indica en este apartat, segons la zona tèrmica en què es localitze l'obra.
- En cas d'emprar el nivell mitjà d'informació dels materials, el projectista podrà, justificadament, adoptar el mòdul de càlcul que considere més adequat a les condicions particulars de l'obra i dels materials; en este cas, els mòduls elàstics empleats no podran quedar fora de l'interval  $E_{min} - E_{MAX}$  indicat en l'apartat 6.2.
- En cas d'emprar el nivell superior d'informació dels materials, el projectista podrà utilitzar, justificadament, el mètode de càlcul que considere oportú per a establir el mòdul elàstic de les distintes capes, sempre que el dit mètode siga capaç de tindre en compte, almenys, les variables següents:
  - Per a les mescles bituminoses: tipus d'aglutinant emprat i les seues característiques (punt de reblaniment, penetració a 25 °C, índex de penetració), temperatura de la mescla, composició i formulació de la mescla.
  - Per als formigons i altres materials amb ciment: composició i formulació de la mescla, resistències previsibles.
  - Per als materials no tractats: humitat del material, estat tensional.

### 5.4.3 Funcions de transferència

Les funcions de transferència són equacions que relacionen la resposta del ferm a l'aplicació de la càrrega tipus (en termes de tensions i deformacions) amb el nombre d'aplicacions de la dita càrrega que la secció és capaç de resistir abans d'arribar a una situació de fallada (esgotament estructural, límit de deformació plàstica acumulada, etc.). Llevat que es dispose d'estudis que justifiquen l'ocupació d'altres funcions de transferència diferents, s'utilitzaran les que s'inclouen en l'apartat 6.2 d'esta norma.

En general, el mode de fallada de les mescles bituminoses i dels materials amb ciment és la fissuració per esforços de tracció repetits i inferiors al seu límit de ruptura, per la qual cosa la funció de transferència d'estos materials és una *lleï de fatiga*; d'altra banda, el mode de fallada dels materials no tractats és generalment l'acumulació de deformacions verticals permanents, per la qual cosa la seua funció de transferència és una *lleï de deformacions*. No obstant això, el projectista podrà considerar, justificadament, altres modes de fallada a més d'estos.

No es consideren d'aplicació les lleis de fatiga a les mescles bituminoses disposades en capes de trànsit de gruix xicotet (mescles tipus BBTM) o drenants (mescles tipus PA), ja que no es troben sotmeses, generalment, a esforços de tracció.

## **5.5 Gruixos màxims i mínims de capa**

Una vegada definit el trànsit equivalent de projecte i fixats la resta dels paràmetres de disseny, per mitjà del dimensionament analític poden calcular-se distintes seccions estructuralment suficients. Per a evitar una excessiva heterogeneïtat en l'inventari de fermes de les carreteres de nova construcció dimensionades amb esta norma, les capes constituents de la secció hauran de complir, en tot cas, i sense prejuí del que estableix l'apartat 6.2 sobre grossàries de capa estesa, les següents disposicions relatives a grossàries de capa:

- El gruix total de mescles bituminoses en calent en una secció de ferm no podrà ser inferior 5 cm ni superior a 35 cm. En el cas que les mescles bituminoses es disposen sobre una capa de grava ciment, el gruix total mínim d'aquelles serà de 15 cm en tots els casos.
- El gruix total de mescles bituminoses d'alt mòdul no podrà ser inferior a 10 cm.
- El gruix total de sòl ciment o de grava ciment no podrà ser inferior a 20 cm ni superior a 30 cm.
- El gruix total de tot-u artificial no podrà ser inferior a 20 cm (15 cm en el cas de vorals) ni superior a 40 cm.

## **5.6 Condicions d'adherència entre capes**

Atés que l'adherència entre les diferents capes que constituïxen un ferm és un dels factors que més influïx en la seua resposta davant de l'aplicació de les càrregues, haurà de garantir-se, prenent les mesures que es consideren necessàries durant la fase de projecte i en l'obra, que es produïx en tots els casos el major grau possible d'adherència entre totes les capes. Als efectes de càlcul, es consideren tres situacions possibles per a cada interfície:

- **Adherència total:** no hi ha lliscament relatiu entre ambdós capes, de manera que els desplaçaments i deformacions en la interfície són iguals en ambdós capes, i apareixen els corresponents esforços tangencials.
- **Adherència parcial:** hi ha un lliscament relatiu limitat entre ambdós capes, de manera que els desplaçaments i les deformacions en la interfície no són iguals en ambdós capes, però hi ha esforços tangencials.
- **Adherència nul·la:** hi ha un lliscament relatiu total entre ambdós capes, de manera que els desplaçaments i les deformacions en la interfície no són iguals en ambdós capes i no hi ha esforços tangencials.

En general, i excepte justificació en contra per part del projectista, se suposarà grau d'adherència total entre capes, excepte en els casos següents:

- Quan sobre la capa de suport d'un paviment de formigó es dispose una làmina de plàstic, es considerarà adherència nul·la.
- Entre dos capes de materials amb ciment es considerarà adherència parcial.
- Si la relació entre mòduls de dos capes contigües és superior a 10 es considerarà adherència parcial.
- En la fase de construcció, quan hi haja evidència que no s'estan garantint les condicions d'adherència total corresponent, es considerarà adherència parcial o nul·la.

Sempre que es calcule la secció considerant adherència parcial o total entre algunes de les seues capes hauran de dissenyar-se les mesures oportunes per a garantir-la (regs d'adherència, d'imprimació, etc.), i hauran d'establir-se els controls corresponents durant la posada en obra.

Quan l'aplicació informàtica emprada per al dimensionament no permeta la modelització de l'adherència parcial entre capes, es prendrà per a la seua utilització en la funció de transferència corresponent la mitjana dels resultats corresponents (deformacions o tensions, segons corresponga) als casos d'adherència total i d'adherència nul·la.

## 5.7 Paràmetres crítics

Els paràmetres crítics formen part de la resposta del ferm davant de l'aplicació de la càrrega i són els que permeten, a través de les funcions de transferència corresponents, determinar el nombre màxim d'aplicacions de la càrrega tipus que cada material és capaç de suportar. Els valors crítics que han de considerar-se són els següents:

- **Mescles bituminoses:** màxima deformació horitzontal de tracció en la fibra inferior de la capa ( $\epsilon_h$ ).
- **Capas amb ciment i sòls estabilitzats S-EST3:** màxima tensió horitzontal de tracció en la fibra inferior de la capa ( $\sigma_h$ ).
- **Capas granulars i esplanades de categoria E1, E2 i E3:** màxima deformació vertical de compressió en la fibra superior de la capa o de l'esplanada ( $\epsilon_z$ ).

Es determinaran en cada cas els valors de càlcul dels paràmetres crítics en els punts **on adquirisquen els seus valors màxims**, és a dir, s'estudiarà si les màximes sol·licitacions es produïxen entre les rodes bessones o en el centre d'estes.

## 5.8 Aplicacions informàtiques

Per a l'obtenció de la resposta de la secció estructural del ferm amb l'aplicació de la càrrega tipus s'emprarà una aplicació informàtica d'acord amb les hipòtesis descrites en este capítol i que permeta dur a terme totes les anàlisis indicades en els apartats anteriors. Es recomana, en principi, l'ocupació de programes de distribució lliure i gratuïta.

És desitjable, encara que no siga imprescindible, que l'aplicació triada permeta algunes de les possibilitats següents:

- L'entrada de dades en unitats del sistema internacional o en múltiples i submúltiples d'estes.
- Diferents graus d'adherència entre les capas.
- L'aplicació de càrregues múltiples.
- Un nombre no limitat de capas.
- La visualització gràfica dels resultats.

## 6 SECCIONS DE FERM

### 6.1 Catàleg de seccions de ferm

A més de proporcionar al projectista les directrius necessàries per al dimensionament analític de les seccions de ferm, en esta norma s'ha optat també per presentar possibles solucions de referència en un catàleg (figura 5), les quals han sigut dimensionades amb criteris analítics i empírics. Els gruixos indicats en les seccions del catàleg es consideren mínims en qualsevol punt de la secció transversal del carril de projecte, i només s'aplicaran directament si les dades disponibles de trànsit són els corresponents al nivell superior d'informació.

Ja que les seccions proposades com a referència només poden considerar-se equivalents per a unes categories de trànsit pesant i d'esplanada determinades només en primera aproximació, és obligació del projectista seleccionar la que, com a resultat d'una anàlisi d'adequació tècnica i econòmica, siga més apropiada a les condicions concretes del projecte, i primarà a estos efectes les qüestions relacionades amb la disponibilitat de materials i amb els costos previsibles de conservació.

Cada secció es designa per un codi de tres o de quatre dígitos:

- Els dos primers en el cas de seccions denominades amb quatre dígitos, o el primer en el cas de seccions denominades amb tres dígitos, indiquen la categoria de trànsit pesant (T00 a T42).
- El tercer en el cas de seccions denominades amb quatre dígitos o el segon en el cas de seccions denominades amb tres dígitos, indica la categoria d'esplanada (E1 a E4).
- L'últim fa referència al tipus de ferm, amb el criteri següent:
  - 1 per a ferm flexible (mescles bituminoses sobre tot-u artificial).
  - 2 per a ferm semirígid (mescles bituminoses sobre sòl ciment).
  - 3 per a ferm semirígid (mescles bituminoses sobre grava ciment).
  - 4 per a ferm rígid (paviment de formigó).

En el cas que el dimensionament de la secció es realitze emprant els nivells de qualitat de la informació de trànsit inferior o mitjà, la grossària de la capa estructural indicada en el catàleg (figura 5) s'haurà d'incrementar en 3 cm (tres centímetres) per a les categories de trànsit pesant T21 superiors, i en 2 cm (dos centímetres) per a la resta. A estos efectes es considerarà com a capa estructural el sòl ciment, la grava ciment, o el paviment de formigó en les seccions tipus 2, 3, o 4 respectivament. En les seccions tipus 1 es considera com a capa estructural la inferior de mescla bituminosa, si per damunt d'esta hi ha almenys altres dos; si no hi ha almenys tres capes de mescla bituminosa, el gruix de la capa de tot-u artificial situada més amunt en el ferm entre les que pogueren haver-hi s'incrementarà en 5 cm (cinc centímetres).

		Categoría de tránsito pesant									
		T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42		
<b>E1</b>	<b>Categoría d'esplanada</b>			26MB+40ZA 19MB+28SC 23HF+15HM	23MB+40ZA 15MB+25SC 23HF+15HM	20MB+40ZA 14MB+25SC 21HF+20ZA	17MB+40ZA 13MB+25SC 21HF+20ZA	12MB+40ZA 12MB+25SC 20HF+20ZA	5MB+40ZA 18HF+20ZA		
			29MB+30ZA 21MB+25SC 15MB+20GC+20SC 25HF+15HM	24MB+30ZA 19MB+25SC 15MB+20GC+20SC 23HF+15HM	20MB+30ZA 16MB+22SC 23HF+15HM	17MB+30ZA 15MB+22SC 21HF+20ZA	14MB+30ZA 14MB+22SC 21HF+20ZA	11MB+30ZA 13MB+20SC 20HF+20ZA	5MB+30ZA 18HF+20ZA		
<b>E2</b>				27MB+30ZA 27HF+15HM 23HFAC+15HM	22MB+30ZA 25HF+15HM	11MB+30ZA 21HF+20ZA	5MB+40ZA 21HF+20ZA	5MB+25ZA 20HF+20ZA	5MB+20ZA 18HF+20ZA		
		31MB+30ZA 28HF+15HM	13MB+25SC 16MB+22GC 15HF+15HM	12MB+25SC 16MB+20GC 23HF+15HM	11MB+20SC 23HF+15HM	10MB+20SC 21HF	21HF	20HF	18HF		
<b>E3</b>		15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	14MB+25SC 18MB+22GC 27HF+15HM 23HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM

En les categories de tránsito T42 podrà disposar-se un reg bicapa amb graveta com a substitució dels 5 cm de mescla bituminosa.

**Figura 5. Catàleg de seccions de ferm**

## 6.2 Materials

En este apartat s'analitzen els possibles materials que s'ha d'utilitzar en les seccions de ferm incloses en el catàleg de la norma (figura 5), per als quals els corresponents plecs de prescripcions tècniques particulars hauran de tindre en compte les especificacions complementàries que s'expressen en este apartat i en els annexos corresponents.

### 6.2.1 Mescles bituminoses en calent

Ja que les característiques mecàniques dels materials tractats amb aglutinants bituminosos depenen de la temperatura i de la velocitat d'aplicació de la càrrega, els càlculs que es realitzen per al dimensionament de la secció hauran de preveure valors de temperatura representatius de les condicions específiques del projecte, d'acord amb el que estableix l'apartat 3.3 d'esta norma. A estos efectes, els valors dels mòduls elàstics indicats en la taula 12 hauran de multiplicar-se pel coeficient corrector  $\gamma_{ZT}$  indicat en la taula 13, en funció de la zona climàtica en què es localitze l'obra considerada.

Pel que fa a l'hora d'aplicació de la càrrega, es considera, excepte millor criteri del projectista degudament justificat, un valor de freqüència de 10,0 Hz. En els casos en què es preveja una velocitat dels vehicles pesants reduïda, es podrà considerar una freqüència d'aplicació de la càrrega de 6,5 Hz. En funció de la freqüència d'aplicació de la càrrega, es modificaran els valors dels mòduls elàstics indicats en la taula 12 multiplicant-los pel coeficient corrector  $\gamma_{HZ}$  indicat en la taula 13.

El valor del mòdul elàstic de les mescles bituminoses que s'ha d'emprar en el dimensionament de la secció (mòdul elàstic de càlcul  $E_{CÀLCUL}$ ) és, per tant, el mòdul mitjà ( $E_{MED}$ ) multiplicat pels coeficients correctors  $\gamma_{ZT}$  i  $\gamma_{HZ}$ :

$$E_{CÀLCULO} = E_{MED} \cdot \gamma_{ZT} \cdot \gamma_{HZ}$$

De la mateixa manera, els valors extrems que definixen el rang admissible dels mòduls elàstics per al nivell d'informació mitjà dels materials ( $E_{min}$  i  $E_{MÀX}$ ) que figuren en la taula 12 s'han de multiplicar en cada cas pel factor de correcció  $\gamma_{ZT}$  indicat en la taula 13, per a tindre en compte la zona tèrmica en la qual es localitza l'obra.

Les lleis de fatiga de les mescles bituminoses són del tipus:

$$\varepsilon_h = a \cdot N_f^{-b}$$

On  $\varepsilon_h$  és la deformació horitzontal de tracció màxima en la capa i el valor de  $a$  depèn del tipus de mescla bituminosa. Llevat que es dispose d'estudis que permeten o aconsellen l'ocupació d'altres valors diferents s'utilitzaran els que s'inclouen en la taula 12.

La utilització d'una mescla bituminosa en calent de característiques genèriques en el dimensionament estarà limitada exclusivament al nivell inferior de qualitat d'informació dels materials, quan no es puguin precisar els tipus de les mescles bituminoses en calent que componguen la secció. Així mateix, es podrà utilitzar en la fase de predisseny de la secció, d'acord amb el que s'ha indicat en el capítol 4. En estos casos, eixa mescla bituminosa genèrica es caracteritzarà per un valor d' $E_{MED}$  de 6.000 MPa, un coeficient de *Poisson* de 0,35 i uns coeficients  $a$  i  $b$  de  $6,691 \cdot 10^{-3}$  i 0,27243 respectivament.

**Taula 12. Característiques mecàniques de les mescles bituminoses**

Tipus	$E_{min}$ [MPa]	$E_{MAX}$ [MPa]	$E_{MED}$ [MPa]	$\nu$	A	b
BBTM 11 B M BBTM 8 B M	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
BBTM 11 A F BBTM 8 A F	4.000	5.250	5.000	0,35	-	-
PA 11	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
AC 16 surf D AC 22 surf D AC 22 bin D	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 16 surf S AC 22 surf S AC 22 bin S AC 32 bin S	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin G AC 32 bin G AC 22 base G AC 32 base G	2.500	7.000	5.000	0,33	$6,443 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin 15/25 AM AC 22 base 15/25 AM	10.000	14.000	11.000	0,30	$6,612 \cdot 10^{-3}$	0,27243

**Taula 13. Coeficients correctors  $\gamma_{ZT}$  i  $\gamma_{Hz}$  per a mescles bituminoses**

Zona tèrmica	$\gamma_{ZT}$	Freqüència [Hz]	$\gamma_{Hz}$
ZT1	1,25	10,0	1,00
ZT2	1,00	6,5	0,85
ZT3	0,80		
ZT4	0,75		



Quan el nivell de qualitat d'informació del trànsit siga el superior, i s'obtinga pel dimensionament mensual, i s'utilitze el concepte de dany de fatiga acumulat segons la hipòtesi de *Miner*, els valors dels mòduls elàstics indicats en la taula 12 s'hauran multiplicat pel coeficient corrector  $\gamma_{MENSUAL}$  indicat en la taula 14, en funció de la zona climàtica en la qual es localitze l'obra considerada i del mes de l'any considerat, de forma que el mòdul elàstic de càlcul per a cada mes  $i$  ( $E_{CÀLCULO}^i$ ) és, per tant, el mòdul mitjà ( $E_{MED}$ ) multiplicat pels coeficients correctors  $\gamma_{MENSUAL}$  i  $\gamma_{Hz}$ :

$$E_{CÀLCULO}^i = E_{MED} \cdot \gamma_{MENSUAL}^i \cdot \gamma_{Hz}$$

**Taula 14. Coeficient corrector  $\gamma_{MENSUAL}$  per a mesclades bituminoses**

Zona tèrmica	GEN.	FBR.	MARÇ	ABR.	MAIG	JUNY	JUL.	AG.	SET.	OCT.	NOV.	DES.
ZT1	1,75	1,70	1,50	1,40	1,10	0,85	0,60	0,65	0,85	1,15	1,50	1,65
ZT2	1,60	1,50	1,30	1,10	0,85	0,60	0,40	0,40	0,55	0,85	1,25	1,50
ZT3	1,25	1,20	1,05	0,90	0,70	0,50	0,40	0,35	0,45	0,70	0,95	1,20
ZT4	1,30	1,20	1,00	0,85	0,65	0,45	0,30	0,30	0,40	0,65	0,95	1,20

Els gruixos de cada capa de mescla bituminosa estaran dins dels rangs establits en la taula 15. En general, i amb l'objectiu de dotar la secció de ferm de la major continuïtat possible, el nombre de capes ha de ser el menor possible.

**Taula 15. Gruixos de les capes de mescla bituminosa**

Tipus de capa	Tipus de mescla	Categoria de trànsit pesant		
		T00 a T21	T22 i T31	T32 a T42
Capa de trànsit	PA 11 <sup>(1)</sup>	4		
	BBTM 11 B M		3	
	BBTM 8 B M			2
	BBTM 11 A F		3	
	BBTM 8 A F			2
	AC 16 surf D		5 – 6	5
	AC 22 surf D			
	AC 16 surf S			
AC 22 surf S				
Intermèdia	AC 22 bin D	7 – 13	5 – 10	
	AC 22 bin S			
	AC 32 bin S			
	AC 22 bin G <sup>(2)</sup>			
	AC 32 bin G <sup>(2)</sup>			
AC 22 bin 15/25 AM				
Base	AC 32 base S	7 – 15		
	AC 22 base G			
	AC 32 base G			
	AC 22 base 15/25 AM			

(1) Es podran projectar paviments amb mescla drenant PA, sempre que es justifique detalladament la seua idoneïtat per al cas concret de què es tracte. La justificació haurà de tindre en compte, entre altres factors, la inclinació longitudinal de la via, la pluviometria de la zona, la intensitat total del trànsit i la necessitat de reduir el soroll en els marges de la carretera. En tot cas, la longitud pavimentada amb este tipus de mescla no serà inferior a 500 m.

(2) Les mescles tipus AC 22 bet G i AC 32 bet G únicament podran emprar-se quan la capa de trànsit siga tipus AC (és a dir, mai amb capes de trànsit tipus PA o BBTM) i amb una dotació mínima d'aglutinant del 4,0% en massa sobre el total de l'àrid sec inclòs el fil·ler.

Com a capa de trànsit haurà d'emprar-se la que satisfaga les condicions funcionals exigides, en funció del trànsit i de la categoria i de les característiques geomètriques de la carretera; excepte justificació en contra, hauran de tindre's en compte les consideracions següents:

- Per a les categories de trànsit pesant T00 a T21 s'empraran com a capa de trànsit les mescles bituminoses del tipus BBTM (preferentment les corresponents al fus granulomètric B).
- A fi de millorar la seguretat i comoditat de la circulació en temps de pluja, en carreteres ubicades dins de la zona pluviomètrica ZP2 amb intensitat de trànsit superior a 10.000 vehicles/dia, independentment del trànsit pesant, s'empraran com a capa de trànsit les mescles bituminoses del tipus BBTM (preferentment les corresponents al fus granulomètric B).

Amb categories de trànsit pesant T00 a T21 categories d'esplanada E3 o E4 podran utilitzar-se, amb justificació prèvia tècnica per part del projectista, mescles bituminoses d'alt mòdul tant en capes de base (AC 22 base 15/25 AM) com en capes intermèdies (AC 22 bet 15/25 AM).

El plec de prescripcions tècniques particulars fixarà el tipus d'aglutinant hidrocarbonat que cal emprar, que serà seleccionat, en funció de la capa a què es destine la mescla bituminosa en calent, de la zona tèrmica en què es trobe i de la categoria de trànsit pesant, entre els que s'indiquen en les taules 16A i 16B.

**Taula 16A. Tipus d'aglutinant que s'ha d'emprar (capa de trànsit i següent)**

Zona tèrmica	Categoria de trànsit pesant				
	T00 a T21	T21	T22 a T32	T41 i T42	Vorals
ZT1, ZT2, ZT3	35/50 50/70 PMB 25/55-65 PMB 45/80-65	50/70 PMB 45/80-60b	50/70 PMB 45/80-60b	50/70	50/70
ZT4	35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-65	35/50 50/70 PMB 25/55-65 PMB 45/80-60b PMB 45/80-65	35/50 50/70 PMB 45/80-60b	50/70	50/70

**Taula 16B. Tipus d'aglutinant que s'ha d'emprar (capa de base, davall dos més)**

Zona tèrmica	Categoria de trànsit pesant		
	T00 i T0	T1 i T21	T22 a T32
ZT1, ZT2, ZT3	50/70 PMB 25/55-65	50/70	50/70
ZT4	35/50 50/70 PMB 25/55-65	35/50 50/70	50/70

Per a mescles bituminoses en calent AC 22 bet 15/25 AM o AC 22 base 15/25 AM, el tipus d'aglutinant hidrocarbonat que s'ha d'emprar serà PMB 10/40-70 per a la categoria de trànsit pesant T00 i 15/25 per a les categories de trànsit pesant T0, T1 i T21.

Per a les categories de trànsit pesant T00 i T0, en les mescles bituminoses que s'ha d'emprar en capes de trànsit s'utilitzaran exclusivament betums asfàltics modificats amb polímers.

Per a mescles bituminoses PA 11, a més dels betums modificats indicats en la taula 16A, es podrà emprar el tipus PMB 45/80-60a, per a les categories de trànsit pesant T00 a T1.

### 6.2.2. Materials amb ciment

Les característiques mecàniques dels materials amb ciment evolucionen amb el temps, per la qual cosa en el dimensionament analític del ferm s'han de tindre en compte:

- Les característiques a mitjà termini i a llarg termini, de manera que siga possible valorar el comportament de la capa durant tota la vida útil del ferm.
- Les característiques a curt termini, de manera que siga possible la comprovació de la capacitat estructural de la capa per a suportar els esforços inicials: trànsit d'obra o trànsit durant el primer any després de la posada en servici.

La llei de fatiga d'un material tractat amb ciment depén de la tensió horitzontal de tracció màxima en la capa  $\sigma_h$  i de la resistència a flexotracció a llarg termini  $R_{F,LP}$  del material:

$$\frac{\sigma_h}{R_{F,LP}} = \gamma_T \cdot (1 - a \cdot \log N_f)$$

El coeficient  $\gamma_T$  s'empra per a ajustar el model teòric al comportament real i el seu valor és de 0,8 per a categories de trànsit pesant T21 o superiors, i d'1,0 per a categories de trànsit pesant T22 o inferiors.

Ja que les funcions de transferència d'este tipus de materials presenten pendents reduïts, una xicoteta variació en la relació entre la tensió de càlcul i la resistència a flexotracció del material dóna com a resultat una gran modificació en el nombre d'aplicacions de càrrega admissibles; per este motiu, els valors de la resistència a flexotracció dels materials tractats amb ciment considerats en el càlcul no podran ser superiors als que figuren en la taula 17.

Per a ferms de carreteres amb categories de trànsit pesant T00 a T22 el formigó del paviment tindrà una resistència característica mínima a flexotracció de 4,5 MPa a 28 dies (HF-4,5). Per a les categories T1, T21 i T22 la dita resistència podrà disminuir-se a 4,0 MPa (HF-4,0) incrementant en 2 cm els gruixos indicats en el catàleg de seccions de ferm (figura 5).

Per a ferms de carreteres amb categories de trànsit pesant T31, T32, T41 i T42 o eventualment en vorals, el formigó del paviment tindrà una resistència característica mínima a flexotracció de 4,0 MPa a 28 dies (HF-4,0), encara que també podrà disminuir-se la dita resistència a 3,5 MPa (HF-3,5) incrementant en 2 cm els gruixos indicats en el catàleg de seccions de ferm (figura 5).

La quantia geomètrica del paviment continu de formigó armat serà del 0,7% per a HF-4,5 i del 0,6% per a HF-4,0. En este tipus de paviments es disposaran ancoratges al terreny en les seccions extremes, així com en les seccions especials que ho requerisquen.

En el cas dels materials granulars tractats amb ciment, habitualment no és senzill conèixer la seua resistència a flexotracció; no obstant això es pot estimar a partir de correlacions amb la resistència a tracció indirecta o amb la resistència a compressió. Si no es disposara de correlacions més precises per al material emprat en cada cas particular, poden utilitzar-se les següents relacions teòriques aproximades:

$$R_{C,LP} = 2 \cdot R_{C,7}$$

$$R_{Ti,LP} = 0,12 \cdot R_{C,LP}$$

$$R_{F,LP} = 1,50 \cdot R_{Ti,LP}$$

on  $R_{C,7}$  i  $R_{C,LP}$  són les resistències a compressió simple a 7 dies i a llarg termini, respectivament, i  $R_{Ti,LP}$  és la resistència a tracció indirecta i  $R_{F,LP}$  la resistència a flexotracció a llarg termini.

Als efectes d'aplicació de les funcions de transferència, quan no es coneguen exactament les característiques de les capes que formen el fonament, les esplanades de

categoria E1 i E2 es consideraran anàlogues a un material granular, independentment que la seua capa superior estiga estabilitzada amb calç o amb ciment. D'altra banda, les esplanades de categoria E4 es consideraran anàlogues als materials tractats amb ciment.

Llevat que es tinguen estudis que permeten o aconsellen l'ocupació d'altres valors diferents s'utilitzaran els que s'inclouen en la taula 17.

**Taula 17. Característiques mecàniques dels materials amb ciment**

Categoria	Tipus	$E_{\min}$ [MPa]	$E_{\max}$ [MPa]	$E_{\text{MED}}$ [MPa]	$\nu$	$a$	$R_{FL}$ P
Formigó	HF-4,5	30.000	38.000	35.000	0,25	0,065	5,50
	HF-4,0	27.000	35.000	32.000	0,25	0,065	4,80
	HF-3,5	25.000	35.000	29.000	0,25	0,065	4,20
Sòl ciment	SC	2.000	8.000	6.000	0,25	0,065	0,90
Grava ciment	GC	18.000	22.000	20.000	0,25	0,065	1,60
Formigó magre	HM	20.000	30.000	24.000	0,25	0,065	3,00
Sòl estabilitzat <i>in situ</i>	S-EST1	100	300	150	0,35	-	-
	S-EST2	200	600	350	0,35	-	-
	S-EST3	1.000	3.000	1.500	0,25	0,065	0,45
Massís Semiindefinit	E4	280	400	300	0,30	-	-

Les capes de ferm constituïdes per materials tractats amb ciment compactats amb corró hauran de ser esteses en capes d'un gruix mínim de 20 cm i un gruix màxim de 30 cm.

Amb l'objectiu de controlar i limitar la reflexió de fissures de retracció de les capes tractades amb ciment en la superfície del paviment, serà necessari prefissurar les dites capes amb una distància entre juntes transversals de contracció que dependrà de la categoria del trànsit pesant, de la zona climàtica en què s'ubique l'obra, i de la naturalesa de la capa, tal com s'indica en la taula 18.

**Taula 18. Distància entre juntes transversals de contracció [m]**

Categoria de trànsit pesant	Zona tèrmica	Sòl ciment	Grava ciment
T00 a T22	ZT1	3,5	3,0
	ZT2	3,0	2,5
	ZT3 i ZT4	4,0	3,5
T31 a T42	ZT1	-	3,5
	ZT2	4,0	3,0
	ZT3 i ZT4	-	4,0

Els sòls estabilitzats *in situ* compliran les prescripcions de l'article 512 "Sòls estabilitzats *in situ*" del plec PG-3. Per la seua banda, el sòl ciment i la grava ciment

compliran les prescripcions de l'article 513 "Materials tractats amb ciment (sòl ciment i grava ciment)" del plec PG-3, amb les modificacions següents:

- La granulometria del material emprat en la fabricació del sòl ciment no haurà d'ajustar-se a cap fus. La grandària màxima no serà superior a 40 mm.
- No es fixaran límits màxims a la resistència mitjana a compressió a 7 dies, quan les capes de sòl ciment o grava ciment es prefissuren.

En els paviments de formigó en massa amb passadors en les juntes transversals, estes es disposaran amb una separació de 5,0 m. En els paviments sense passadors, la distància entre juntes transversals de contracció serà de 4,0 m en les zones tèrmiques ZT3 i ZT4, i de 3,5 m en les ZT1 i ZT2.

Amb trànsits de projecte T32 o superiors, les juntes longitudinals aniran proveïdes de barres d'unió i se segellaran en tots els casos. Respecte al segellat de les juntes transversals, tant de contracció com de formigonat, segons la zona pluviomètrica, es projectarà d'acord amb el criteri següent:

- Zona pluviomètrica ZP1: podran deixar-se sense segellar.
- Zona pluviomètrica ZP2: segellades com les juntes longitudinals.

Es projectaran juntes transversals de dilatació davant d'estructures o on poguera estar especialment impedit el moviment de les lloses del paviment. En estos casos en la fase de projecte s'estudiarà el disseny específic de les dites juntes.

En els revolts amb radi inferior a 200 m serà necessària la realització d'un estudi especial sobre la disposició de juntes transversals de contracció o de dilatació, a fi de limitar les possibles tensions que pogueren produir-se per l'efecte de les temperatures. A falta del dit estudi, en la majoria dels casos podrà ser suficient amb la disposició de juntes de dilatació al començament i al final del revolt, i es mantindrà la longitud de les lloses adoptada per al conjunt de l'obra.

Les bases de formigó magre compliran les prescripcions de l'article 551 "Formigó magre vibrat" del plec PG-3, amb les modificacions següents:

- La resistència mitjana a compressió simple a 7 dies serà igual o superior a 8 MPa.

Per la seua banda, els paviments de formigó vibrat compliran les prescripcions de l'article 550 "Paviments de formigó" del plec PG-3, amb les modificacions següents:

- Els passadors aniran proveïts d'una funda de plàstic antiadherent almenys en la meitat i compliran les prescripcions de la Norma UNE-EN 13877-3.
- D'acord amb el tipus de producte de segellat que s'empre, este haurà de complir les prescripcions de la Norma UNE-EN 14188-1 (productes aplicats en calent), UNE-EN

14188-2 (productes de segellat aplicats en fred) o UNE-EN 14188-3 (perfils preformats).

- Quan es preveja l'extensió d'una capa de trànsit de mescla bituminosa sobre un paviment de formigó armat continu, la curació es realitzarà amb emulsió bituminosa o per mitjà de cobriment amb làmina plàstica. En tal cas, amb caràcter previ a l'extensió de la mescla bituminosa de capa de trànsit, s'aplicarà el corresponent reg d'adherència.

### 6.2.3 Materials no tractats

Ja que les característiques mecàniques dels materials no tractats (materials granulars i sòls naturals) depenen de la humitat de la capa, els càlculs que es realitzen per al dimensionament de la secció han de preveure valors d'humitat representatius de les condicions específiques del projecte, d'acord amb el que estableix l'apartat 3.3 d'esta norma.

El control de les deformacions permanents acumulades en els materials no tractats s'estableix per mitjà de la limitació de la màxima deformació vertical de compressió en la capa (que sol localitzar-se en la fibra superior):

$$\varepsilon_z = a \cdot N_f^{-b}$$

A més, per a evitar que es produïsquen descompressions en les capes constituïdes per materials no tractats, s'ha de complir la condició que la tensió horitzontal màxima en estes siga inferior a la suma de la tensió vertical màxima més el pes propi del ferm sobre estes (de gruix  $h_F$  cm), i s'assumix una densitat simplificada d'este de 2,20 t/m<sup>3</sup>:

$$\sigma_h \leq \sigma_z + 2,20 \cdot 10^{-3} \cdot h_F$$

Quan no es coneguen exactament les característiques de les capes que formen el fonament, les esplanades de categoria E1 i E2 es consideraran anàlogues a un material granular, independentment que la capa superior estiga estabilitzada amb calç o amb ciment.

El mòdul d'elasticitat dels tot-u depén de la capacitat de suport de les capes subjacents (expressada a través del seu mòdul d'elasticitat  $E_S$ ) i del gruix de la capa ( $h$ ). Llevat que es dispose d'estudis que permeten o aconsellen l'ocupació d'altres valors diferents s'utilitzaran els que s'inclouen en la taula 19.

**Taula 19. Característiques mecàniques dels materials no tractats**

Categoria	Tipus	$E_{\min}$ [MPa]	$E_{\max}$ [MPa]	$E_{\text{MED}}$ [MPa]	$\nu$	$a$	$b$
Tot-u artificial <sup>(1)</sup>	ZA	80	600	$0,206 \cdot h^{0,45} \cdot E_s$	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Massís Semiindefinit	E1	35	65	50	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E2	70	105	85	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E3	155	280	215	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Sòl natural	-	30	250	$10 \cdot \text{CBR}$	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25

<sup>(1)</sup> Per al càlcul d' $E_{\text{MED}}$  s'aplicarà l'expressió indicada, en la qual  $E_s$  és el mòdul del massís semiindefinit, capa, o capa subjacent en MPa, i  $h$  és el gruix en mm de la capa per a la qual es calcula el mòdul d'elasticitat, i s'obté el resultat en MPa.

Les capes de ferm i les empleades en la formació de la part superior del fonament constituïdes per materials no tractats hauran de ser esteses en capes d'un gruix mínim de 20 cm (15 cm en el cas de vorals) i un gruix màxim de 30 cm.

#### 6.2.4 Altres materials

A més dels materials relacionats anteriorment, podran utilitzar-se els que el projectista, amb justificació prèvia tècnica i econòmica, considere oportuns, entre els següents:

- Regs amb graveta.
- Mescles bituminoses obertes en fred.
- Grava emulsió.
- Grava escòria.
- Macadam.

Tant la seua caracterització mecànica com les funcions de transferència emprades si és el cas, hauran d'estar convenientment justificades.

### 6.3 Avaluació econòmica de les seccions de ferm

#### 6.3.1 Introducció

Amb l'avaluació econòmica dels fermes es poden pretendre dos objectius diferents. El primer es pot emmarcar en les tasques de planificació de l'administració: comparar diferents tipus de solucions de manera que es puguem establir directrius de caràcter general que, en tot cas, hauran de ser revisades en materialitzar-les en un projecte concret. El segon objectiu consisteix en l'estimació, per a una secció determinada, de quins són, en les condicions concretes del projecte, els costos de construcció i, si és el cas, els de



conservació que es produiran en el futur. Per a determinar estos costos és necessari conèixer, entre altres, aspectes com ara la situació geogràfica de l'obra, el seu volum, la disponibilitat de materials de construcció, l'equipament de què disposen les empreses que poden ser adjudicatàries de l'obra, l'època de l'any en què s'executaran els treballs, etc. En definitiva, esta avaluació econòmica és la que cal dur a terme per mitjà d'un estudi detallat en el moment de redactar el projecte, i poden haver-hi notables diferències d'un cas a un altre, fins i tot havent triat en ambdós la mateixa solució tècnica.

Els criteris per a dur a terme una avaluació econòmica depenen de l'organisme que la realitze (administració pública, empresa privada o entitat financera), del seu abast (avaluació de plans o de projectes) i de la possibilitat d'expressar comptablement els costos i beneficis que es produïxen al llarg del temps que es considere en l'anàlisi. El criteri que s'utilitza habitualment quan es tracta de projectes d'obres promogudes per les administracions públiques és el del valor actualitzat net (VAN), el qual expressa la diferència entre la suma dels beneficis actualitzats nets i la suma dels costos actualitzats nets, i és un dels índexs de significat més clar en la valoració econòmica de projectes, ja que resulta més interessant aquell en què el VAN siga major (o menys negatiu, si els costos superen els beneficis).

Les anàlisis econòmiques han d'estendre's a un determinat període o *cicle* vital, que és el temps per al qual es vol que el cost global actualitzat siga mínim. A vegades es considera un període d'anàlisi econòmica igual al període de projecte de les distintes seccions de ferm. No obstant això, no s'ha de confondre un concepte merament econòmic amb un altre de significat estrictament tècnic. Ha de tendir-se a triar un període d'anàlisi tal que la influència de la taxa d'actualització que es trie siga el menor possible, per a així aconseguir objectivar al màxim el procés. Per a això, ha d'anar-se'n a períodes d'anàlisis inferiors a 5 anys (el que no té sentit) o superiors a 35.

En esta norma es considera com més apropiat prendre un període d'anàlisi de 40 anys. D'esta manera cal incloure en l'anàlisi econòmica totes les operacions que puguen tindre lloc des del moment de la construcció del ferm, incloent les operacions de rehabilitació que siguen necessàries després de la finalització del període de projecte per a continuar aprofitant la infraestructura existent. D'altra banda, este període d'anàlisi permet comparacions entre seccions de ferm que són dissenyades per a períodes de projecte diferents entre si.

Per a poder sumar els diferents costos que es produïxen al llarg del període d'anàlisi i trobar el cost global d'una secció és necessari una actualització dels que es produïxen en diferents moments. La taxa d'actualització  $a$  que es fixe és un paràmetre fonamental del càlcul. Per a l'avaluació d'inversions públiques, se sol treballar amb taxes d'actualització variant entre el 4 i el 15%. Per a projectes d'infraestructures de transport és habitual adoptar el valor  $a = 6\%$ . En tot cas, serà l'administració la que fixe quina taxa d'actualització ha de ser utilitzada en cada moment.

L'elecció d'una determinada taxa té gran influència en el resultat dels estudis econòmics. Si la taxa triada és alta, les estratègies d'inversió que resulten més favorables són les que tenen menors inversions inicials (i suposen, per tant, menor durabilitat en principi) i preveuen per al futur suficients rehabilitacions de mitjana durabilitat. Estes estratègies poden resultar perilloses, ja que l'estat del ferm pot abaixar del mínim acceptable si no es complix estrictament el que s'ha planificat. Al contrari, taxes baixes afavorixen estratègies marcades per inversions inicials altes que retarden la necessitat de rehabilitacions importants. La seua aplicació exigix, no obstant això, que no hi haja restriccions pressupostàries.

En les anàlisis econòmiques es considera que la taxa d'actualització es manté constant al llarg de tot el període d'anàlisi (al contrari del que sol succeir amb els tipus d'interés en les anàlisis financeres). D'altra banda, es recomana treballar amb euros constants, és a dir, no considerar inclosa la inflació en la taxa d'actualització.

### 6.3.2 Costos de construcció

La forma habitual de determinar els costos de construcció en les obres públiques partix del fet (no estrictament cert, no obstant això) que no hi ha diferència entre qui subministra els materials i qui els posa en obra. Els costos finals s'obtenen, així com la suma dels corresponents a cada una de les unitats d'obra definides, en el plec de prescripcions tècniques (preus unitaris). Al seu torn, resulta habitual justificar els costos de cada unitat d'obra com la suma de quatre components:

- Costos dels materials.
- Costos de la mà d'obra.
- Costos de la maquinària.
- Costos indirectes.

Al cost final obtingut com a suma del de les distintes unitats d'obra (preu unitari multiplicat pel mesurament d'eixa unitat) se li denomina habitualment cost d'execució material. Este ha de ser incrementat en els percentatges que l'administració tinga establits com de despeses generals o d'estructura i de benefici industrial, així com la corresponent a l'impost sobre el valor afegit (IVA). S'obté així finalment el pressupost base de licitació.

### 6.3.3 Costos dels usuaris

Cal distingir entre dos classes de costos que l'usuari ha de suportar: els costos genèrics d'explotació i els costos específics associats a operacions de conservació o de rehabilitació.

Els costos genèrics d'explotació poden al seu torn agrupar-se en quatre categories:

- Despeses de funcionament del vehicle: consum de combustible, lubricants, pneumàtics, peces de recanvi, reparacions i depreciació.
- Costos relacionats amb el temps de recorregut.
- Costos dels accidents.
- Costos associats a la comoditat dels usuaris.

Estos costos genèrics d'explotació depenen de la regularitat superficial, de la resistència al lliscament i de la velocitat, i estes variables estan relacionades entre si. Per exemple, en disminuir la regularitat, augmenta el desgast del vehicle i la incomoditat de l'usuari, disminueix així mateix la velocitat, augmenta el temps de recorregut i disminueix el consum de combustible i la gravetat dels accidents. A més, la velocitat també està influïda pel nivell de servici que la carretera proporciona, i disminueix quan augmenta la intensitat de la circulació. No hi ha suficients dades sobre la influència del comportament del paviment sobre els costos de l'usuari associats a l'explotació normal de la carretera. Però mentre l'estat del paviment es mantinga dins d'uns límits acceptables, la diferència de costos atribuïble a comportaments distints és de difícil estimació i probablement xicoteta. En tot cas, l'administració no sol incloure este concepte en els seus estudis de rendibilitat.

D'altra banda, les operacions de conservació i de rehabilitació, per dur-se a terme generalment amb circulació, induïxen en els usuaris uns costos específics associats a eixes operacions i que depenen de:

- La programació de les obres.
- La intensitat de la circulació.
- La regulació que es faça d'eixa circulació.

L'estructura d'estos costos és igual a la dels costos genèrics d'explotació. Però en este cas el factor predominant és el relacionat amb la demora provocada per la limitació de velocitat. En menor grau, sempre que els treballs se senyalitzen adequadament, estan els costos derivats d'accidents.

Amb baixes intensitats de circulació els vehicles hauran de reduir la seua velocitat normal fins a una velocitat limitada (i fins i tot de vegades hauran de detindre's, si així ho exigix la regulació de la circulació); amb la dita velocitat limitada es transitarà per la zona d'obres fins que, sobrepassada esta, es puga recuperar la velocitat normal. Si la intensitat de la circulació supera la capacitat de la regulació disposada es produiran retencions i la demora i el consum de combustible augmentaran notablement. Per tant, tindre en compte estos costos amb altes intensitats de circulació pot influir decisivament en l'elecció de l'estratègia de conservació més adequada: interessaran els fermes més duradors i que exigisquen el menor nombre d'operacions de rehabilitació, que també hauran de ser el més duradores possible.

#### 6.3.4 Costos de conservació i costos globals

El cost global d'una secció de ferm el dona l'expressió següent:

$$C = C_1 + C_2 - C_3 + C_4 \quad [1]$$

on:

- $C$  és el cost global de la secció.
- $C_1$  és el cost de construcció (inversió inicial).
- $C_2$  és el cost de conservació, inclou tant els costos de les operacions ordinàries com els costos de rehabilitacions que es produeixen durant el període a què s'estén l'anàlisi econòmica, tots estos actualitzats a l'any de la construcció.
- $C_3$  és el valor residual de la secció al final del període a què s'estén l'anàlisi econòmica i actualitzada a l'any de la construcció.
- $C_4$  representa el conjunt de costos, també convenientment actualitzats, que suporten els usuaris de la carretera com a conseqüència de les labors de conservació: demores, despeses addicionals de combustible, etc.

El cost de conservació està format per dos sumands i el dona l'expressió:

$$C_2 = C_{21} + C_{22} \quad [2]$$

on:

- $C_{21}$  són els costos de conservació ordinària al llarg del període d'anàlisi.
- $C_{22}$  són els costos de les rehabilitacions o operacions de conservació extraordinàries realitzades durant el període d'anàlisi.

Els costos de conservació ordinària  $C_{21}$  poden ser avaluats de dos formes diferents. La primera consistix a estimar les distintes operacions que han de ser dutes a terme durant el període de projecte, calculant els seus respectius costos i actualitzant-los a l'any de la construcció. Esta és la millor forma si es disposa de bases de dades sobre les necessitats reals de conservació ordinària de cada secció i és igual que la que se segueix per als costos de rehabilitació.

La segona forma d'avaluar els costos de conservació ordinària consistix a suposar que en cada un dels anys del període d'anàlisi la despesa que es produïx per eixe concepte és un percentatge  $b$  del cost de construcció  $C_1$  de la secció de què es tracte.

Per tant:

$$C_{21} = b/100 \cdot C_1 \cdot \left[ (1+a)^{-1} + (1+a)^{-2} + \dots + (1+a)^{-40} \right] \quad [3]$$

Si es considerara  $a = 6\%$ ,

$$C_{21} = 0,1505 \cdot b \cdot C_1 \quad [4]$$

Per a poder avaluar els costos de les rehabilitacions  $C_{22}$  és necessari preveure quines operacions d'este tipus es realitzaran durant el període d'anàlisi. Si s'han previst, per exemple, actuacions extraordinàries de conservació als 10, 20, 30 i 35 anys, de cost respectiu  $R_{10}$ ,  $R_{20}$ ,  $R_{30}$  i  $R_{35}$ , el cost actualitzat del conjunt d'estes el donarà l'expressió:

$$C_{22} = R_{10} \cdot (1+a)^{-10} + R_{20} \cdot (1+a)^{-20} + R_{30} \cdot (1+a)^{-30} + R_{35} \cdot (1+a)^{-35} \quad [5]$$

Si es considerara  $a = 6\%$ ,

$$C_{22} = 0,56 \cdot R_{10} + 0,31 \cdot R_{20} + 0,17 \cdot R_{30} + 0,13 \cdot R_{35} \quad [6]$$

El valor residual  $C_3$  d'una secció de ferm és el que esta secció costa al final del període d'anàlisi. Es pot avaluar de molt diverses formes. Una d'estes és com un percentatge  $V$  del cost de construcció  $C_1$  convenientment actualitzat (encara que segons alguns autors, sols s'hauria de considerar el cost dels materials i no el de la posada en obra):

$$C_3 = V/100 \cdot C_1 \cdot (1+a)^{-40} \quad [7]$$

Si es considerara  $a = 6\%$ ,

$$C_3 = 0,0010 \cdot V \cdot C_1 \quad [8]$$

S'ha de tindre en compte, no obstant això, que el valor residual depén també en gran mesura del cost de les operacions de conservació que s'hagen fet al llarg del dit període d'anàlisi. De tota manera, el valor residual sol influir poc en les anàlisis econòmiques, ja que se situa al final del període, i encara menys com més alta siga la taxa d'actualització.

En definitiva, el cost global d'una secció el donarà l'expressió següent:

$$C = C_1 + b/100 \cdot C_1 \cdot \left[ (1+a)^{-1} + (1+a)^{-2} + \dots + (1+a)^{-40} \right] + R_{10} \cdot (1+a)^{-10} + R_{20} \cdot (1+a)^{-20} + R_{30} \cdot (1+a)^{-30} + R_{35} \cdot (1+a)^{-35} - V/100 \cdot C_1 \cdot (1+a)^{-40} + C_4 \quad [9]$$

Si es considerara  $a = 6\%$ ,

$$C = C_1 + 0,1505 \cdot b \cdot C_1 + 0,56 \cdot R_{10} + 0,31 \cdot R_{20} + 0,17 \cdot R_{30} + 0,13 \cdot R_{35} - 0,0010 \cdot V \cdot C_1 + C_4 \quad [10]$$

## 6.4 Estratègies de conservació

En el projecte, les seccions de ferm no descartades en una primera fase d'avaluació tècnica han de comparar-se, com s'ha indicat en l'apartat anterior, des del punt de vista dels seus costos de construcció i, en última instància, dels seus costos globals, incorporant per a això els costos de conservació ordinària i els de rehabilitació estimats per al període d'anàlisi establida (així com, si fóra possible, els induïts en els usuaris com a conseqüència de les actuacions de conservació).

El càlcul dels costos de construcció ha de fer-se a partir de les seccions tipus establides per a trams rectes i per unitat de longitud, incloent, per tant, els vorals. Així mateix, s'ha d'incloure el cost de la formació de l'esplanada, tant en l'opció d'ocupació de sòls d'aportació com en la d'estabilització *in situ* per incorporació de calç o de ciment. En els mesuraments de les seccions s'han d'afegir els sobreamples i els vessaments que corresponguen. Els costos unitaris empleats seran els d'execució material, amb la precisió a què s'haja arribat en el projecte de traçat.

Els costos globals han d'incloure, com ja s'ha exposat, tant els de construcció com, convenientment actualitzats, els de conservació al llarg del període d'anàlisi, i el valor residual que se li puga suposar a cada secció al final de tal període. Els costos de conservació s'establiran d'acord amb hipòtesis versemblants i suficientment justificades d'estratègies de conservació ordinària i de rehabilitació periòdica per a cada secció durant el període d'anàlisi econòmica. Com a mínim, s'han de considerar dos estratègies diferents. De totes maneres, per a simplificar el procés, la valoració dels costos de conservació es pot reduir a la secció de menor cost de construcció i a aquelles altres que no el superen en més d'un 20%. Finalment la secció de ferm triada serà la que presente un cost global actualitzat més avall.

L'estratègia de conservació i de rehabilitació d'un tram de carretera amb característiques homogènies es pot definir com el conjunt d'actuacions que seria necessari desenvolupar durant la seua vida útil perquè els indicadors de comportament del ferm no traspassaren els límits establits. La seua elaboració està vinculada a nombrosos factors, d'índole tant tècnica com econòmica:

- Trànsit.
- Disponibilitat de materials.
- Tipus de secció estructural del ferm.
- Mitjans humans i materials disponibles.
- Assignacions pressupostàries anuals o plurianuals.
- Etc.

L'objectiu d'una estratègia de conservació i de rehabilitació ha de ser, amb les restriccions corresponents, aconseguir la vida més llarga del ferm amb el menor cost. Açò porta lògicament que no totes les estratègies que pogueren plantejar-se tècnicament siguen econòmicament adequades, però totes estes poden incloure's en dos grans grups:

- El primer grup d'estratègies està format per les que preveuen fonamentalment unes grans operacions de rehabilitació que han de realitzar-se en moments concrets i molt separats en el temps, i que intenten restituir pràcticament les condicions inicials del ferm.
- L'altre grup comprén les estratègies en què es preveuen principalment unes operacions freqüents, de manera que les característiques inicials del ferm es vagen perdent amb la major lentitud possible.

Les estratègies de conservació i de rehabilitació que han de ser considerades per a la determinació dels costos globals de les seccions de ferm considerades tècnicament adequades en el projecte han de ser, segons s'ha indicat, com a mínim dos, i en este cas cada una d'estes ha d'estar enquadrada en els dos grups que s'acaben de descriure. En tot cas, el projectista sol·licitarà dels corresponents servicis de conservació les informacions necessàries per a establir primer eixes estratègies i, a continuació, valorar-les econòmicament.

## 7 VORALS

### 7.1 Generalitats

Excepte justificació en contra, el ferm dels vorals d'amplària no superior a 1,00 m serà, per raons constructives, prolongació del ferm de la calçada adjacent. La seua execució serà simultània, sense junta longitudinal entre la calçada i el voral.

En vorals d'amplària superior a 1,00 m, el seu ferm dependrà de la categoria de trànsit pesant prevista per a la calçada i de la secció adoptada en esta; s'evitarà en la mesura que es puga l'aparició de noves unitats d'obra. Excepte justificació en contra, s'adoptarà una de les solucions que s'indiquen en els apartats següents, que estan previstes per a unes sol·licitacions del trànsit pesant d'acord amb les funcions pròpies dels vorals.

Per a les categories de trànsit pesant T00 a T31 i en les vies de servici no agrícoles d'autopistes i autovies és preceptiu, per exigències de seguretat de la circulació viària, que els vorals disposen d'una capa de trànsit completa transversalment i amb la mateixa rasant que la calçada, de manera que no hi haja un escaló entre ambdós superfícies.

En el cas que, d'acord amb els estudis de trànsit, es consideren probable sol·licitacions més intenses que les que en principi correspondrien a la categoria de trànsit pesant adoptada, serà possible justificar, amb caràcter excepcional, seccions dels vorals de major capacitat estructural que les indicades en este apartat, amb l'autorització prèvia de la Direcció General d'Obres Públiques de la Conselleria d'Infraestructures i Transport. En este supòsit es podria arribar fins i tot a disposar del mateix ferm que en la calçada, aprofitar els avantatges constructius i permetre així en cas necessari utilitzar els vorals com a carrils addicionals o, si a mitjà termini fóra previsible, eixamplar la calçada a costa del voral sense obligacions constructives addicionals.

### 7.2 Categories de trànsit pesant T00 a T21.

En els fermes amb capa de trànsit bituminosa, en tots els casos les capes de trànsit i intermèdia del voral seran prolongació de les disposades en la calçada i, per tant, d'igual naturalesa. El seu gruix no baixarà en cap cas de 15 cm sobre llasts artificials i de 10 cm sobre capes tractades amb ciment.

Davall del paviment del voral es podrà optar per disposar:

- Sòl ciment, procurant enrasar amb la cara inferior de les mescles bituminoses de la calçada i en tot cas amb el gruix mínim indicat en l'apartat 6.2.2. Esta solució amb sòl ciment, que preceptivament serà prefissurat amb els espaiaments indicats en la taula 18, serà preferent quan s'empree este tipus de material o grava



ciment en la calçada. La resta del gruix, fins a aconseguir l'esplanada, es completarà amb tot-u artificial.

- Tot-u artificial, procurant enrasar amb la cara inferior de les mescles bituminoses de la calçada i en tot cas amb les limitacions de gruix especificades en l'apartat 6.2.3.

Si es justifica per raons constructives, i en el cas que no s'empren en el ferm de la calçada, en les categories de trànsit pesant T1 o T21 el sòl ciment podrà substituir-se per un sòl seleccionat o adequat estabilitzat *in situ* amb ciment tipus S-EST3, amb una resistència a compressió simple a 7 dies no inferior a 2,5 MPa i prefissurat amb els espaiaments indicats en la taula 18.

En els fermes amb paviment de formigó, en les categories de trànsit pesant T00 i T0, el paviment del voral serà de formigó en massa, d'ídèntiques característiques que l'utilitzat en la calçada, i amb un gruix mínim de 15 cm, excepte en els 50 cm interiors, en els quals el gruix haurà de coincidir, en tot cas, amb el corresponent de la calçada. Fins a aconseguir l'esplanada es disposarà un tot-u artificial o un sòl ciment. El paviment del voral anirà lligat al paviment de la calçada per mitjà de barres d'unió.

Per a la categoria de trànsit pesant T1 i T21 els vorals podran pavimentar-se amb formigó en massa o amb mescla bituminosa. Si es pavimenten amb formigó en massa es podrà utilitzar una solució igual a la indicada per a les categories de trànsit pesant T00 i T0. Alternativament es podrà pavimentar el voral amb formigó magre de gruix uniforme, igual al paviment de la calçada, amb juntes transversals de contracció i lligat a este per mitjà de barres d'unió; fins a aconseguir l'esplanada es disposarà un tot-u artificial o un sòl ciment. Si es disposara un voral amb paviment de mescla bituminosa en calent, les seues característiques seran semblants a les especificades en el cas de calçades amb paviment també de mescla bituminosa.

La junta entre un paviment de calçada de formigó i un voral també de formigó haurà de segellar-se sempre.

### **7.3 Categories de trànsit pesant T22 i T31**

El paviment del voral constarà d'una capa de mescla bituminosa amb el mateix gruix que la capa de trànsit del ferm de la calçada, excepte si esta fóra dels tipus PA o BBTM, i en este cas el paviment del voral es constituirà amb les mateixes capes de trànsit i intermèdia que el ferm de la calçada, de manera que vagen enrasades les capes intermèdies.

Davall del paviment del voral es disposarà tot-u artificial fins a aconseguir l'esplanada; en tot cas les capes compliran les limitacions de gruix contingudes en l'apartat 6.2.3. Alternativament, es podrà disposar davall el paviment una capa de sòl ciment prefissurat amb els espaiaments indicats en la taula 18 i amb un gruix dins dels límits

indicats en l'apartat 6.2.2; la resta, fins a arribar a l'esplanada, es completarà amb tot-u artificial. En este cas el sòl ciment podrà substituir-se per un sòl seleccionat o adequat estabilitzat *in situ* amb ciment tipus S-EST3, amb una resistència a compressió simple a 7 dies no inferior a 2,5 MPa i prefissurat amb els espaiaments indicats en la taula 18.

#### **7.4 Categories de trànsit pesant T32 a T42**

El voral, enrasat sempre amb la calçada, podrà no estar pavimentat, o tindre un paviment constituït per un reg amb graveta. El ferm del voral estarà constituït per tot-u artificial, procurant enrasar amb una de les capes del ferm de la calçada; i la resta, fins a l'esplanada, podrà ser de tot-u artificial o de sòl seleccionat. Si no es pavimentara es projectaran vorals amb tot-u els fins del quals tinguen un índex de plasticitat (IP) entre 6 i 10.

En via de servici no agrícoles d'autopistes i autovies el voral tindrà un paviment constituït per un tractament superficial, el qual podrà no disposar-se en els altres casos. La capa de base estarà constituïda per tot-u artificial, procurant enrasar amb una de les capes del ferm de la calçada; la resta, fins a arribar a l'esplanada, serà de tot-u, o de sòl seleccionat amb un CBR  $\geq 20$  en les condicions especificades de posada en obra.

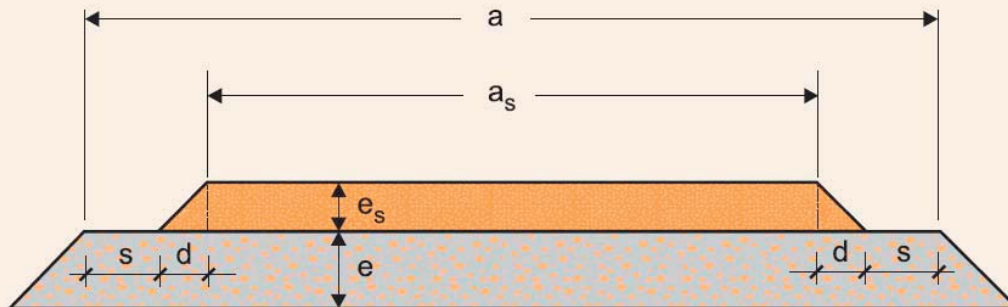
## 8 ASPECTES CONSTRUCTIUS

L'amplària de la capa de trànsit depassarà la teòrica almenys en 20 cm per cada vora.

Cada capa del ferm tindrà una amplària ( $a$ ) en la cara superior, igual a la de la capa immediatament superior ( $a_s$ ) més la suma dels sobreamples ( $d$ ) i ( $s$ ) indicats en la taula 20. El sobreample ( $s$ ) podrà augmentar-se si hi ha necessitat de disposar d'un suport per a l'extensió de la capa superior.

Taula 20. Valors de sobreamples

Sobreample	Material	Valor [cm]
Per vessaments ( $d$ )	Paviment de formigó	0
	Formigó magre	0
	Tots	$e_s$
Per criteris constructius ( $s$ )	Mescles bituminoses	5
	Formigó magre	20
	Altres materials amb ciment	6 a 10
	Capcs granulars	10 a 15



$$a = a_s + 2d + 2s$$

## 9 DEFINICIONS

**BERMA:** franja longitudinal contigua al voral, si n'hi ha, en la vora de la plataforma. És una zona de seguretat i s'utilitza per a l'eventual circulació de vianants i col·locació d'elements auxiliars de la carretera.

**CALÇADA:** part de la carretera destinada a la circulació de vehicles. Es compon d'un carril o de diversos carrils.

**CAPA:** capa de material d'un determinat gruix, estesa d'una vegada sobre una superfície regular.

**CAPA DE BASE:** capa del ferm situada davall del paviment la missió de la qual és eminentment estructural.

**CAPA DE TRÀNSIT:** capa superior o única d'un paviment de mescla bituminosa.

**CAPA DE SUBBASE:** capa del ferm situada immediatament davall de la capa de base i sobre l'esplanada, que pot no existir o, al contrari, estar composta per diverses capes.

**CAPA ESTRUCTURAL:** vegeu **CAPA DE BASE**.

**CAPA INTERMÈDIA:** capa d'un paviment de mescla bituminosa situada davall de la capa de trànsit.

**CAPACITAT DE SUPORT:** aptitud d'un sòl, terraplé, desmunt o esplanada per a suportar les càrregues de trànsit transmeses a través de la secció de ferm.

**CARRIL:** cada una de les franges longitudinals en què pot estar dividida la calçada, delimitada per marques vials longitudinals o no, i amb amplària suficient per a la circulació d'una fila d'automòbils que no siguin motocicletes.

**CARRIL DE PROJECTE:** carril pel qual circula el nombre més gran de vehicles pesants en una calçada.

**CATEGORIES D'ESPLANADA:** tipus d'esplanada que s'establixen, segons la seua capacitat resistent, als efectes de dimensionament de la secció estructural del ferm.

**CATEGORIES DE TRÀNSIT PESANT:** intervals que s'establixen, als efectes del dimensionament de la secció estructural del ferm, per a la intensitat mitjana diària de vehicles pesants (IMDP) o per al trànsit equivalent de projecte (TEP<sub>128kN</sub>), segons siga el nivell de qualitat de la informació disponible sobre el trànsit pesant.

**COEFICIENT D'AGRESSIVITAT (CA):** nombre d'eixos equivalents de 128 kN (EE<sub>128kN</sub>) que exercixen el mateix dany sobre el ferm que el produït pel conjunt d'eixos d'un vehicle pesant determinat, als efectes del dimensionament de la secció d'un ferm.

**COEFICIENT D'AGRESSIVITAT MITJÀ (CAM):** valor mitjà dels coeficients d'agressivitat (CA) dels vehicles pesants. Este coeficient pot aplicar-se al conjunt total del trànsit pesant (CAM), o per separat per a cada una de les categories de vehicle pesant considerades (CAM<sub>i</sub>).

**DESMUNT:** excavació per davall de la cota del nivell natural del terreny per a realitzar l'esplanació d'una carretera.

**EIX EQUIVALENT (EE<sub>128kN</sub>):** eix de referència per al dimensionament de la secció de ferm i per a la caracterització del trànsit pesant; es tracta d'un eix simple amb rodes bessones, que suporta una pes total de 13 t, i exercix una pressió teòrica de contacte de 900 kPa, i la separació de la qual entre els centres de les rodes és, als efectes de càlcul, de 31,92 cm.

**EIX SIMPLE:** aquell que dista de l'eix més pròxim més d'1,50 m.

**EIX TÀNDEM O DOBLE:** conjunt de dos eixos adaptats, tal que la distància entre estos és inferior a 1,50 m.

**EIX TRÍDEM O TRIPLE:** conjunt de tres eixos adaptats, tal que la distància entre cada dos d'estos consecutius és inferior a 1,50 m.

**ESPLANADA:** superfície superior del fonament d'un ferm, siga en desmunt o en terraplé, sobre la qual es recolza el ferm.

**ESTRUCTURA DEL FERM:** vegeu **SECCIÓ DE FERM**.

**FERM:** conjunt de capes executades amb materials seleccionats i, generalment, tractats, que constituïxen la superestructura de la plataforma, resistix les càrregues del trànsit i permet que la circulació tinga lloc amb seguretat i comoditat.

**FERM FLEXIBLE:** ferm constituït per capes granulars no tractades i, en general, per mesclades bituminoses, encara que a vegades pot haver sobre aquelles només un tractament superficial.

**FERM RÍGID:** ferm amb paviment de formigó.

**FERM SEMIRÍGID:** ferm constituït per un paviment bituminós de qualsevol gruix sobre una o més capes de grava ciment o de sòl ciment, amb gruix conjunt d'estes igual o superior a 20 cm.

**FONAMENT DEL FERM:** conjunt de capes de sòls naturals, sòls estabilitzats o altres materials que es troba davall el pla de l'esplanada, que comprén la mateixa esplanada i el terreny natural subjacent.

**FORMIGÓ MAGRE:** mescla homogènia d'àrids, ciment, aigua i additius, empleada en capes de base davall el paviment de formigó, que es posa en obra amb una consistència tal que requerix l'ocupació de vibradors interns per a la seua compactació.

**FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA:** expressió matemàtica que permet estimar el nombre d'aplicacions de càrrega que un material pot suportar fins al seu esgotament, en funció d'un determinat paràmetre característic del seu comportament estructural.

**GRAVA CIMENT:** mescla homogènia d'àrids, ciment, aigua i ocasionalment additius, realitzada en la central, que convenientment compactada es pot utilitzar com a capa estructural en fermes de carreteres.

**INTENSITAT MITJANA DIÀRIA (IMD):** nombre total de vehicles que circulen per una secció transversal de la carretera durant un any, dividit entre 365.

**INTENSITAT MITJANA DIÀRIA DE VEHICLES PESANTS (IMDP):** nombre total de vehicles pesants que circulen per una secció transversal de la carretera durant un any, dividit entre 365.

**LLETADA BITUMINOSA:** mescla fabricada a temperatura ambient, amb una emulsió bituminosa, àrids, aigua i additius, la consistència de la qual és adequada per a la seua posada en obra i pot aplicar-se en una o diverses capes.

**MESCLA BITUMINOSA D'ALT MÒDUL:** mescla bituminosa en calent en la qual el valor del mòdul d'elasticitat a 20 °C és superior a 10.000 MPa.

**MESCLA BITUMINOSA EN CALENT:** combinació d'un aglutinant hidrocarbonat, àrids (inclòs el fil·ler) i additius, de manera que totes les partícules d'àrid queden recobertes d'una pel·lícula d'aglutinant; el seu procés de fabricació implica calfar l'aglutinant i els àrids, i la seua posada en obra es realitza a una temperatura sensiblement superior a l'ambient.

**MESCLA BITUMINOSA OBERTA EN FRED:** combinació d'una emulsió bituminosa, àrids amb un contingut de fins reduït i additius, de manera que totes les partícules d'àrid queden recobertes d'una pel·lícula d'aglutinant. El seu procés de fabricació no implica calfar l'aglutinant ni els àrids, i la seua posada en obra es realitza a temperatura ambient.

**MÒDUL D'ELASTICITAT:** en un material de comportament essencialment elàstic és el quocient entre la tensió aplicada en un assaig uniaxial i la deformació unitària produïda en el mateix eix.

**PAVIMENT:** part superior d'un ferm, que ha de resistir directament els esforços produïts per la circulació, i proporciona a esta una superfície de trànsit còmode i segura.

**PAVIMENT DE FORMIGÓ:** paviment constituït per lloses de formigó en massa, separades per juntes, o per una llosa contínua de formigó armat; el formigó es posa en obra amb una consistència tal que requereix l'ocupació de vibradors interns per a la seua compactació i maquinària específica per a la seua extensió i acabat superficial.

**PERÍODE DE DISSENY:** període de temps en què es pretén que el ferm (o la capa que es considere) no presente una degradació estructural generalitzada.

**PLATAFORMA:** zona de la carretera ocupada per la calçada, vorals i bermes adjacents.

**SECCIÓ DE FERM:** conjunt de capes executades amb materials seleccionats col·locat sobre l'esplanada per a suportar les càrregues del trànsit i permetre la circulació en condicions de seguretat i comoditat. Constituïx l'estructura resistent de la calçada o voral i comprén en general, de baix a dalt, les capes de subbase, base i paviment.

**SISTEMA VIARI DE LA COMUNITAT VALENCIANA:** conjunt de carreteres, i es consideren com a tals les vies de domini i ús públic projectades i construïdes, fonamentalment, per a la circulació de vehicles automòbils, sense menyscabament de la deguda consideració que en cada cas requeriran altres modes de transport, com el de vianants, i els camins de domini públic de qualsevol classe aptes, almenys, per al trànsit rodat, independentment de les seues característiques i titularitat, que discórreguen pel territori de la Comunitat Valenciana. No formen part del sistema viari les vies urbanes, llevat que estes vies tinguen la condició legal de travessera.

**SÒL CIMENT:** mescla homogènia de materials granulars (tot-u, sòl granular o productes inerts de rebuig), ciment, aigua i eventualment additius, realitzada en la central, que convenientment compactada es pot utilitzar com a capa estructural en fermes de carretera.

**SÒL ESTABILITZAT *IN SITU*:** mescla homogènia i uniforme d'un sòl amb calç o amb ciment i aigua, realitzada en la mateixa traça de la carretera, que té com a objecte millorar determinades propietats d'aquell, en especial la seua susceptibilitat a l'acció de l'aigua.

**SÒL GRANULAR:** sòl constituït per arenes i graves en la seua major part.

**TERRAPLÉ:** reblert format per extensió i compactació de sòls per damunt de la cota del terreny natural.

**TOT-U ARTIFICIAL:** material granular, de granulometria contínua, constituït per partícules totalment o parcialment triturades, utilitzat com a capa de ferm.

**TRACTAMENT SUPERFICIAL:** tècnica de pavimentació l'objectiu de la qual és dotar el ferm d'unes certes característiques superficials, sense augment directe i apreciable de la capacitat resistent.

**TRAM:** longitud de via o carretera entre dos seccions transversals del seu traçat.

**TRAM DE PROJECTE:** cada una de les parts en què queda dividida la longitud de la via o carretera, i que es caracteritzen per uns factors de disseny homogenis.

**TRÀNSIT EQUIVALENT DE PROJECTE (TEP<sub>128kN</sub>):** nombre acumulat d'eixos equivalents de 128 kN (EE<sub>128kN</sub>) previst per al carril de projecte durant el període de disseny del ferm.

**VEHICLE PESANT:** als efectes d'esta norma, vehicle la massa total del qual, inclosa la seua càrrega, siga igual o superior a 3,5 t.

**VEHICLE PESANT RÍGID:** vehicle pesant de més de quatre rodes i sense remolc.

**VEHICLE PESANT ARTICULAT:** el compost per un element tractor (cap tractor) i d'un element remolcat (semiremolc); este està normalment proveït només d'eixos posteriors, i es recolza, es transmet i s'articula sobre aquell.

**VIA DE SERVICI:** camí sensiblement paral·lel a una carretera, respecte de la qual té caràcter secundari, connectat a esta només en alguns punts, i que servix a les propietats o edificis contigus. Pot ser de sentit únic o de doble sentit de circulació.

**VIDA ÚTIL:** vegeu **PERÍODE DE DISSENY**.

**VORAL:** als efectes d'aplicació d'esta norma, es definix com la franja longitudinal contigua a la calçada, dotada de ferm, però no destinada a l'ús per part de vehicles automòbils més que en circumstàncies excepcionals.



## 10 SIGLES I ACRÒNIMS

**IRI:** Índex de Regularitat Internacional [m/km o mm/m].

**MPD:** Mean Profile Depth o Profunditat Mitjana del Perfil [mm].

**ETD:** Estimated Texture Depth o Profunditat Estimada de Textura [mm]. Es tracta d'una estimació estadística del resultat de l'assaig de taca d'arena, obtinguda a partir del valor de la **MPD**. En absència d'estudis específics pot emprar-se l'expressió següent

$$ETD = 0,8 \cdot MPD + 0,2$$

**MTD:** Mean Texture Depth o Profunditat Estimada de Textura [mm]. Resultat de l'assaig de taca d'arena.

**CRL:** Coeficient de Fregament Longitudinal. És el quocient entre la força horitzontal que apareix en el punt de contacte entre pneumàtic i paviment en el mateix sentit de la marxa (o la projecció sobre eixa direcció d'una força horitzontal que tinga qualsevol altra direcció) i la força vertical que actua sobre tal punt de contacte. En la pràctica, el valor del CRL depèn de l'equip que s'empren per a la seua mesura.

**CRT:** Coeficient de Fregament Transversal. És el quocient entre la força horitzontal que apareix en el punt de contacte entre pneumàtic i paviment en el sentit perpendicular al de la marxa (o la projecció sobre eixa perpendicular d'una força horitzontal que tinga qualsevol altra direcció) i la força vertical que actua sobre tal punt de contacte. En la pràctica, el valor del CRT depèn de l'equip que s'empren per a la seua mesura.

## **A PRESCRIPCIONS TÈCNIQUES PARTICULARS D'UNITATS D'OBRA**

### **A.1 Tot-u artificial**

#### **A.1.1 Introducció**

El plec de prescripcions tècniques generals per a obres de carreteres i ponts (PG-3) del Ministeri de Foment estableix, amb caràcter general, les condicions mínimes que han de satisfer els materials i els procediments utilitzats en la construcció i el control de les distintes unitats d'obra, en particular les utilitzades en la constitució de fermes i paviments (Orde del Ministeri de Foment 891/2004, d'1 de març, publicada en el *Boletín Oficial del Estado* de 6 d'abril de 2004). No obstant això, algunes prescripcions requereixen precisions addicionals que el plec de prescripcions tècniques particulars del projecte (PPTP) o bé el director de les obres hauran d'establir.

Segons estableix el mateix PG-3, el que s'ha indicat en el PPTP preval en qualsevol cas sobre el que s'ha establert en aquell. Per tant, el PPTP no sols ha de precisar, si és el cas, el que no haja fet el PG-3, sinó que pot incorporar, modificar o suprimir prescripcions, a fi d'adaptar les condicions d'execució de les obres a la realitat. S'ha de tindre en compte, a este respecte, que el PG-3 té un àmbit territorial d'aplicació molt extens i variat, per això, en determinats llocs, és imprescindible adaptar les especificacions generals al clima local, als procediments constructius habituals i als materials realment disponibles sobre la utilització d'estos hi ha una experiència contrastada positiva.

D'acord amb el que s'ha exposat anteriorment, la Generalitat ha considerat convenient redactar estes recomanacions per a la redacció del PPTP, de manera que, sense alterar l'esperit ni l'estructura del PG-3, s'aconsegueisca la màxima adaptació a la realitat de la Comunitat Valenciana, sense disminuir, per descomptat, la qualitat finalment aconseguida. El PG-3 continuarà constituint la prescripció general de referència, i en este sentit s'ha de citar expressament en el plec del projecte. Addicionalment, els paràgrafs corresponents d'estes recomanacions s'hauran de reproduir íntegrament en el PPTP, i s'hi afegiran, a més, si es procedent, les precisions requerides directament per estos paràgrafs o per la redacció original del PG-3 en la mesura que no haja sigut modificada.

#### **A.1.2 Característiques generals dels materials per a tot-u**

L'apartat 510.2.1 es substituït pel text que es recull a continuació:

*Per a qualsevol categoria de trànsit pesant es podran utilitzar materials granulars reciclats, àrids siderúrgics, subproductes i productes inerts de rebuig, en compliment de l'Acord del Consell de Ministres d'1 de juny de 2001, pel qual s'aprova el Pla Nacional de Residus de*

*Construcció i Demolició 2001-2006, sempre que complisquen les prescripcions tècniques exigides en este article, i es declare l'origen dels materials, tal com s'establix en la legislació comunitària sobre estes matèries. Així mateix, es tindrà en compte el que establix el Reial Decret 105/2008, d'1 de febrer, pel qual es regula la producció i gestió dels residus de construcció i demolició.*

### A.1.3 Neteja

En relació amb el que disposa l'apartat 510.2.3 s'adopta la redacció següent:

*L'equivalent d'arena, segons la UNE-EN 933-8 (utilitzant la fracció 0/4 mm segons s'establix en l'annex A), del material de tot-u artificial haurà de complir el que s'ha indicat en la taula 510.1. Si no es complix esta condició, el seu valor de blau de metilè, segons la UNE-EN 933-9, haurà de ser inferior a deu (10), i, simultàniament, l'equivalent d'arena no haurà de ser inferior en més de cinc unitats als valors indicats en la taula 510.1.*

**Taula 510.1. Equivalent d'arena (EA) de tot-u artificial**

<i>Categoria de trànsit pesant</i>		
<i>T00 a T1</i>	<i>T21 a T42</i> <i>Vorals de T00 a T22</i>	<i>Vorals de T31 a T42</i>
<i>EA &gt; 35</i>	<i>EA &gt; 30</i>	<i>EA &gt; 25</i>

*En el cas de tot-u natural, el plec de prescripcions tècniques particulars podrà disminuir en cinc (5) unitats cada un dels valors mínims exigits en la taula 510.1. El plec de prescripcions tècniques particulars podrà establir esta mateixa disminució de cinc (5) unitats en el valor mínim de l'equivalent d'arena en el cas dels camins de domini públic de qualsevol classe (vies no classificades com a carreteres), així com en les vies interiors, públiques o privades, de les urbanitzacions residencials.*

### A.1.4 Resistència a la fragmentació

S'adopta la redacció següent en lloc de la recollida en l'apartat 510.2.5:

*El coeficient de Los Àngeles, segons la UNE-EN 1097-2, dels àrids per a tot-u artificial no haurà de ser superior als valors indicats en la taula 510.2.*

*Per a materials reciclats procedents de capes de mescla bituminosa de fermes de carretera o de demolicions de formigons, així com per a àrids siderúrgics, el valor del coeficient de Los Àngeles podrà ser superior en cinc (5) unitats als valors que s'exigixen en la taula 510.2, sempre que la seua composició granulomètrica estiga adaptada al fus ZAD20, especificat en la taula 510.3.1.*

**Taula 510.2. Valor màxim del coeficient de Los Ángeles  
per als àrids de tot-u artificial**

<i>Categoria de trànsit pesant</i>	
<i>T00 a T1</i>	<i>T21 a T42 i vorals</i>
30	35

*En el cas dels àrids per a tot-u natural, el valor màxim del coeficient de Los Ángeles serà superior en cinc (5) unitats als valors que s'exigixen en la taula 510.2, quan es tracte d'àrids naturals. El plec de prescripcions tècniques particulars podrà establir este mateix augment de cinc (5) unitats en el valor màxim del coeficient de Los Ángeles en el cas dels camins de domini públic de qualsevol classe (vies no classificades com a carreteres), així com en les vies interiors, públiques o privades, de les urbanitzacions residencials.*

*Per a materials reciclats procedents de capes de mescla bituminosa de ferms de carretera o de demolicions de formigons i per a àrids siderúrgics que s'han d'utilitzar com a tot-u natural el valor del coeficient de Los Ángeles podrà ser superior fins en deu (10) unitats als valors que s'exigixen en la taula 510.2.*

#### A.1.5 Central de fabricació de tot-u artificial

El text següent substituïx el que figura en l'apartat 510.4.1:

*“La fabricació de tot-u artificial per a l'ús en ferms de calçades de carreteres amb categoria de trànsit pesant T00 a T1 es realitzarà en centrals de mescla. El plec de prescripcions tècniques particulars fixarà el tipus i la producció horària mínima de la central.*

*En qualsevol cas, la instal·lació haurà de permetre dosificar per separat les distintes fraccions d'àrid i l'aigua en les proporcions i amb les toleràncies fixades en la fórmula de treball. El nombre mínim de fraccions per a tot-u artificial serà de dos (2).*

*Les tremuges per als àrids hauran de tindre parets resistents i estanques, boques d'amplària suficient perquè la seua alimentació s'efectue correctament, proveïdes d'una reixeta que permeta limitar la grandària màxima, així com d'un sobreeixidor que evite que un excés de contingut afecte el funcionament del sistema de classificació. Es disposaran amb una separació suficient per a evitar contaminacions entre estes. Així mateix, estes tremuges hauran d'estar proveïdes en l'eixida de dispositius ajustables de dosificació.*

*Els sistemes de dosificació dels materials podran ser volumètrics; no obstant això, el plec de prescripcions tècniques particulars o, si no n'hi ha, el director de les obres podrà establir que siguin en massa quan l'obra tinga una superfície de pavimentació superior a setanta mil metres quadrats (70.000 m<sup>2</sup>).*

*Si s'utilitzen centrals de fabricació amb dosificadors en massa, estos hauran de ser independents; almenys un (1) per a cada una de les fraccions de l'àrid. La precisió del dosificador serà superior al dos per cent ( $\pm 2\%$ ).*

*L'aigua afegida es controlarà per mitjà d'un cabalímetre, la precisió del qual siga superior al dos per cent ( $\pm 2\%$ ), i un totalitzador amb indicador en la cabina de comandament de la central.*

*Els equips de mescla hauran de ser capaços d'assegurar la completa homogeneïtzació dels components dins de les toleràncies fixades.*

*Per a la fabricació de tot-u artificial en vies amb categories de trànsit pesant T21 a T32, el plec de prescripcions tècniques particulars podrà admetre la fabricació in situ. Esta es realitzarà per mitjà d'equips específics les característiques de la qual han de ser definides en el plec de prescripcions tècniques particulars. En tot cas s'ha de garantir amb estos una granulometria precisa i homogènia i un bon repartiment de l'aigua necessària per a la compactació. Estos equips han de realitzar les operacions de dosificació, distribució de l'aigua, mescla i extensió en continu, sense intervenció manual. No han de tindre fugues, gotejos ni obstruccions, ni presentar desgastos o brutícia en els seus elements.*

*En les carreteres amb categoria de trànsit pesant T41 i T42, en els camins de domini públic de qualsevol classe (vies no classificades com a carreteres) i en les vies interiors, públiques o privades, de les urbanitzacions residencials, la fabricació de tot-u artificials es durà a terme in situ.*

*El director de les obres aprovarà l'equip de fabricació, una vegada realitzades les proves de producció i comprovades la correcta dosificació i homogeneïtzació de la mescla.”*

#### **A.1.6 Equips de extensió**

L'apartat 510.4.3 queda reduït al paràgraf següent:

*En tots els casos, el plec de prescripcions tècniques particulars haurà de definir o, si no n'hi ha, el director de les obres hauran d'aprovar els equips d'extensió de tot-u.*

#### A.1.7 Extensió de tot-u

En l'apartat 510.5.4 la redacció queda de la manera següent:

*“Una vegada acceptada la superfície d'assentament es procedirà a l'extensió de tot-u, en capes de gruix no superior a trenta centímetres (30 cm), i es prendran les precaucions necessàries per a evitar segregacions i contaminacions. El director de les obres podrà aprovar l'extensió de capes en gruixos superiors a l'indicat si es comprova que amb els equips de compactació disponibles s'aconsegueixen, tant en la part superior com en la inferior de la capa, les densitats mínimes especificades en l'apartat 510.7.1.*

*Totes les operacions d'aportació d'aigua hauran de tindre lloc abans d'iniciar la compactació. Després, l'única admissible serà la destinada a aconseguir, en superfície, la humitat necessària per a l'execució de la capa següent.”*

#### A.1.8 Densitat

L'apartat 510.7.1 queda amb la redacció següent:

*“Per a les categories de trànsit pesant T00 a T1, la compactació de tot-u artificial haurà de tindre una densitat no inferior a la que corresponga al cent per cent (100%) de la màxima de referència, obtinguda en l'assaig Proctor modificat, segons la UNE 103501.*

*En el cas de tot-u natural o quan el tot-u artificial s'haja d'utilitzar en calçades de carreteres amb categoria de trànsit pesant T21 a T42 o en vorals, es podrà admetre una densitat no inferior al noranta-huit per cent (98%) de la màxima de referència obtinguda en l'assaig Proctor modificat, segons la UNE 103501.*

*En el cas dels camins de domini públic de qualsevol classe (vies no classificades com a carreteres) i en les vies interiors, públiques o privades, de les urbanitzacions residencials, el plec de prescripcions tècniques particulars podrà admetre una densitat no inferior al noranta-cinc per cent (95%) de la màxima de referència obtinguda en l'assaig Proctor modificat, segons la UNE 103501.”*

#### A.1.9 Capacitat de suport

L'apartat 510.7.2 queda amb la redacció següent:

“El control de la capacitat de suport de les capes de tot-u es basarà en els resultats d'assajos d'auscultació de la deflexió per mitjà d'un deflectòmetre d'impacte configurat per a exercir una càrrega de 49 kN sobre una placa de 30 cm de diàmetre, o equivalent en termes de pressió de contacte sobre la superfície.

A partir de les deflexions enregistrades pel deflectòmetre, es calcularà el mòdul elàstic de superfície de la capa, que té la rigidesa equivalent, amb aplicació de l'expressió següent:

$$E_0 = \frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot r \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

on  $E_0$  és el mòdul elàstic de superfície de la capa,  $\nu$  és el coeficient de Poisson considerat (es prendrà un valor de 0,35),  $\sigma_0$  és la pressió aplicada sobre la superfície, i  $d_0$  la deflexió enregistrada sota el punt d'aplicació de la càrrega.

Els valors de referència mínims dels mòduls elàstics de superfície seran els especificats en la taula 510.5A, segons la categoria de trànsit pesant considerada.

Els valors de la taula 510.5A es referixen al valor característic del mòdul elàstic de superfície  $E_{0,ck}$  obtingut com la mitjana ( $m$ ) menys una vegada la desviació típica ( $s$ ) dels resultats, almenys, de set assajos en el cas de longituds que s'han d'avaluar inferiors a 500 m, de deu assajos per a longituds entre 500 i 1.000 m, o del nombre d'assajos que s'obtinga com a resultat de dividir entre 100 la longitud que s'ha d'avaluar quan esta siga superior a 1.000 m, és a dir, realitzant un assaig cada 100 m.

Per a poder dur a terme el control de capacitat de suport de les capes de tot-u artificial per mitjà del deflectòmetre d'impacte, serà preceptiva l'execució d'un impacte d'assentament, i posterior a este s'hauran d'efectuar, almenys, dos impactes de 49 kN en cada punt d'assaig, i es prendrà com a valor representatiu la mitjana de les deflexions obtingudes en cada un d'estos, sempre que els seus valors no diferisquen en més del 5%; en cas contrari, l'assaig no es podrà considerar vàlid.

Si no es disposa d'un deflectòmetre d'impacte, el director de les obres podrà autoritzar el control de la capacitat de suport per mitjà de l'assaig de càrrega amb placa. En este cas, el valor del mòdul de compressibilitat en el segon cicle de càrrega de l'assaig de càrrega amb placa ( $E_{v2}$ ), segons la NLT-357, serà superior al menor valor dels següents:

- Els especificats en la taula 510.5B, establida segons les categories de trànsit pesant.
- Si el tot-u es recolza directament sobre l'esplanada, el valor exigít a esta superfície multiplicat per un coma tres (1,3).

**Taula 510.5A. Valors de referència mínims del mòdul elàstic de superfície  $E_{0,ck}$  [MPa]**

Categoria de trànsit pesant				
T00 a T1	T21 i T22	T31 i T32	T41 i T42 Vorals T21 i T22	Vorals T31 a T42
375	345	290	215	175

**Taula 510.5B. Valors mínims del mòdul  $E_{v2}$  [MPa]**

Categoria de trànsit pesant				
T00 a T1	T21 i T22	T31 i T32	T41 i T42 Vorals T21 i T22	Vorals T31 a T42
250	150	100	75	60

A més del que s'ha exposat anteriorment, el valor de la relació de mòduls  $E_{v2}/E_{v1}$  serà inferior a dos unitats (2,0), llevat que el director de les obres indicara un altre valor.

Les mateixes exigències establides per als vorals de carreteres amb categories de trànsit pesant T31 a T42 seran les que s'apliquen en el cas dels camins de domini públic de qualsevol classe (vies no classificades com a carreteres) i en les vies interiors, públiques o privades, de les urbanitzacions residencials.”

#### A.1.10 Rasant, gruix i amplària

Es modifica el contingut de l'apartat 510.7.3 a fi de canviar el límit entre les categories de trànsit pesant a les quals se'ls exigixen valors distints, de manera que esta prescripció queda de la manera següent:

“Disposats els sistemes de comprovació aprovats pel director de les obres, la rasant de la superfície acabada no haurà de superar la teòrica en cap punt ni quedar per davall d'esta en més de quinze mil·límetres (15 mm) en calçades de carreteres amb categoria de trànsit pesant T00 a T1, ni en més de vint mil·límetres (20 mm) en la resta dels casos. El plec de prescripcions tècniques particulars o el director de les obres podran modificar els límits anteriors.



*En tots els semiperfils es comprovarà l'amplària de la capa utilitzada, que, en cap cas, no haurà de ser inferior a l'establida en els plans de seccions tipus. Així mateix, el gruix de la capa no haurà de ser inferior en cap punt al previst per a esta en els plans de seccions tipus; en cas contrari es procedirà segons l'apartat 510.10.3."*

#### A.1.11 Criteris d'acceptació o rebuig del lot. Regularitat superficial

En relació amb el contingut de l'apartat 510.10.5, la redacció queda com segueix a continuació:

*"En el cas de tot-u artificial, si els resultats de la regularitat superficial de la capa acabada excedixen els límits establits, es procedirà a escarificar la capa en una profunditat mínima de quinze centímetres (15 cm) en tota la longitud afectada i es tornarà a compactar i a refinar a càrrec del contractista."*

#### A.1.12 Especificacions tècniques i distintius de qualitat

L'últim apartat de l'article 510 del PG-3 (el 510.12) s'ha d'adaptar necessàriament a l'àmbit administratiu de la Generalitat, per la qual cosa queda així:

*"El compliment de les especificacions tècniques obligatòries requerides als productes previstos en este article es podrà acreditar per mitjà del corresponent certificat que, quan les dites especificacions estiguen establides exclusivament per referència a normes, podrà estar constituït per un certificat de conformitat amb les dites normes.*

*Si els referits productes disposen d'una marca, un segell o un distintiu de qualitat que assegure el compliment de les especificacions tècniques obligatòries d'este article, s'acceptarà com a tal quan el dit distintiu estiga reconegut per la Generalitat.*

*El certificat acreditatiu del compliment de les especificacions tècniques obligatòries d'este article podrà ser atorgat per la Direcció General d'Obres Públiques de la Conselleria d'Infraestructures i Transport de la Generalitat o pels organismes espanyols públics i privats autoritzats per a realitzar tasques de certificació o assajos en l'àmbit dels materials, dels sistemes i dels processos industrials, de conformitat amb el Reial Decret 2200/1995, de 28 de desembre.*

## **A.2 Mescles bituminoses en calent**

### **A.2.1 Introducció**

En el plec de prescripcions tècniques generals per a obres de carreteres i ponts (PG-3) del Ministeri de Foment les especificacions de les mescles bituminoses en calent estan recollides en els articles 542 (mescles bituminoses en calent) i 543 (mescles bituminoses discontinües en calent per a capes de trànsit). La redacció actual dels dos articles va ser aprovada per Orde del Ministeri de Foment 891/2004, d'1 de març, publicada en el *Boletín Oficial del Estado* de 6 d'abril de 2004. No obstant això, l'entrada en vigor l'1 de març de 2008 del marcatge CE de les mescles bituminoses en calent, amb caràcter obligatori, suposa haver de definir estos materials d'acord amb les normes UNE-EN 13108 i caracteritzar-los per mitjà dels mètodes d'assaig descrits en les normes UNE-EN 12697. Mentre no es dispose d'una guia d'aplicació nacional en la qual es fixen les opcions d'assaig que s'han d'aplicar entre les que es recullen en les últimes normes esmentades i s'establisquen referències dels corresponents paràmetres (dit d'una altra manera: mentre no hi haja una nova redacció dels dos mencionats articles del PG-3 que no entre en contradicció amb la nova realitat derivada de l'obligatorietat del marcatge CE), s'estarà en una situació transitòria que cal intentar que es prolongue el mínim possible.

Per això, la Generalitat ha considerat convenient recollir en este annex a la Norma de Seccions de Ferm de la Comunitat Valenciana les precisions indispensables per a adaptar-se, en redactar els plecs de prescripcions tècniques particulars dels projectes, al que imposa el marcatge CE de les mescles bituminoses en calent.

### **A.2.2 Tipus de mescles bituminoses en calent**

Les normes UNE-EN 13108 recullen els tipus de mescles bituminoses en calent següents:

- Formigó bituminós (Asphalt Concrete, AC).
- Formigó bituminós per a capes de poc gruix (Béton bitumineux très mince, BBTM).
- Soft Asphalt.
- Hot Rolled Asphalt (HRA).
- Stone Mastic Asphalt (SMA).
- Màstic bituminós (Mastic Asphalt).
- Mescla porosa (Porous Asphalt, PA).

De tots estos tipus, només els formigons bituminosos (AC), els formigons bituminosos per a capes de poc gruix (BBTM) i les mescles poroses (PA) s'utilitzen de

manera generalitzada a Espanya i estan inclosos en les especificacions del Ministeri de Foment; no obstant això, les mescles del tipus SMA s'utilitzen cada vegada més, almenys en algunes regions. Els AC inclouen les mescles denses (D), semidenses (S) i gruixudes (G), així com les mescles d'alt mòdul (MAM), mentre que els BBTM inclouen tant els microaglomerats del tipus M com els del tipus F.

La norma UNE-EN 13108-8 es referix a un huité material no citat entre els anteriors: les mescles reciclades. Però la dita norma no es referix realment a un tipus de mescla, sinó que en esta es considera el fresatge com a material constituent de la resta de mescles bituminoses en calent, i s'especifiquen els requisits per a la seua classificació i descripció.

### A.2.3 Denominacions de les mescles bituminoses en calent

Les mescles del tipus AC s'han de denominar de la forma següent:

*AC D surf/bin/base lligant granulometria*

on:

- *D* és la dimensió màxima nominal de l'àrid (16, 22 o 32 mm).
- *surf/bin/base* són els indicatius de les capes en les quals es pot situar la mescla bituminosa (trànsit, intermèdia o base).
- *lligant* és el tipus que s'utilitze, segons les normes europees, siga betum asfàltic (norma EN 12591), betum asfàltic dur per a mescles d'alt mòdul (norma EN 13924) o betum modificat (norma EN 14023).
- *granulometria* és el tipus de fus utilitzat segons la denominació tradicional espanyola: D, S, G o MAM.

Quant a les mescles del tipus BBTM la seua denominació respon a l'esquema següent:

*BBTM D classe lligant*

on *D* (8 o 11 mm) i *lligant* es referixen al mateix que en el cas anterior i la *classe* en pot ser una de les quatre definides en la norma UNE-EN 13108-2: A, B, C o D, corresponent la classe A a les mescles espanyoles del tipus F i la classe B a les mescles M.

Finalment, la denominació de les mescles poroses és:

*PA D lligant*

i la dimensió màxima nominal de l'àrid d'estes mescles és 11 o 16 mm.

Les dimensions màximes nominals citades no exclouen altres possibles que puguen resultar més convenients en determinades circumstàncies. Per exemple, en capes de regularització es podran utilitzar, com ara és habitual, mescles del tipus AC amb una dimensió màxima nominal d'11 mm o, fins i tot, de només 8 mm.

#### A.2.4 Utilització de les mescles bituminoses en calent

En la Norma de Seccions de Ferm de la Comunitat Valenciana s'han establert les condicions d'utilització dels diferents tipus de mescles bituminoses en calent indicades en la taula A.1.

**Taula A.1. Gruixos de les capes de mescla bituminosa**

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado		
		T00 a T21	T22 y T31	T32 a T42
Rodadura	PA 11 <sup>(1)</sup>	4		
	BBTM 11 B M	3		
	BBTM 8 B M		2	
	BBTM 11 A F	3		
	BBTM 8 A F		2	
	AC 16 surf D		5 - 6	5
	AC 22 surf D			
	AC 16 surf S			
AC 22 surf S				
Intermedia	AC 22 bin D	5 - 10		
	AC 22 bin S			
	AC 32 bin S			
	AC 22 bin G <sup>(2)</sup>			
	AC 32 bin G <sup>(2)</sup>			
	AC 22 bin 15/25 MAM	7 - 13		
Base	AC 32 base S	7 - 15		
	AC 22 base G			
	AC 32 base G			
	AC 22 base 15/25 MAM			

- (1) Es podran projectar paviments amb mescla drenant PA, sempre que es justifique detalladament la seua idoneïtat per al cas concret de què es tracte. La justificació haurà de tindre en compte, entre altres factors, la inclinació longitudinal de la via, la pluviometria de la zona, la intensitat total del trànsit i la necessitat de reduir el soroll en els marges de la carretera. En qualsevol cas, la longitud pavimentada amb este tipus de mescla no serà inferior a 500 m.
- (2) Les mescles tipus AC 22 bin G i AC 32 bin G únicament podran utilitzar-se quan la capa de trànsit siga de tipus AC (és dir, mai no sota trànsits de tipus PA o BBTM) i amb una dotació mínima de lligant de 4,0% en massa sobre el total de l'àrid sec inclòs el fil·ler mineral (3,85% sobre la massa total de la mescla).

## A.2.5 Fusos granulomètrics de les mescles bituminoses en calent

Les mescles bituminoses en calent del tipus AC (formigons bituminosos) hauran de tindre granulometries que s'inscriuen en els fusos següents que s'indiquen en la taula A.2.a.

**Tabla A.2.a. Fusos granulomètrics dels formigons bituminosos**

Tamices UNE-EN 933-2 (mm)	AC16D	AC22D	AC16S	AC22S	AC32S	AC22G	AC32G	AC22MAM
45					100		100	
32		100		100	90-100	100	90-100	100
22	100	90-100	100	90-100		90-100		90-100
16	90-100	73-88	90-100	70-88	68-82	65-86	58-76	70-88
8	64-74	55-70	60-75	50-66	50-66	40-60	35-54	50-66
4	44-59		35-50					
2	31-46	31-46	24-38	24-38	24-38	18-32	18-32	24-38
0,500	16-27	16-27	11-21	11-21	11-21	7-18	7-18	11-21
0,250	11-20	11-20	7-15	7-15	7-15	4-12	4-12	8-15
0,063	4-8	4-8	3-7	3-7	3-7	2-5	2-5	6-9

Les mescles PA i BBTM tindran les mateixes granulometries que les actuals mescles PA, d'una banda, i F i M, d'una altra, definides, respectivament, en els fins ara vigents articles 542 i 543 del PG-3 (en la nova redacció d'estos articles, el dos tipus de mescles passen a estar especificats en l'article 543), i s'adapten els tamisos de major dimensió a la nova sèrie. En la taula A.2.b es definixen estos fusos.

**Taula A.2.b. Fusos granulomètrics de les mescles per a capes de trànsit dels tipus BBTM i PA.**

Tamices UNE-EN 933-2 (mm)	BBTM 8B *	BBTM 11B *	BBTM 8A *	BBTM 11A *	PA 11
16		100		100	100
11,2	100	90-100	100	90-100	90-100
8	90-100	60-80	90-100	62-82	50-70
5,6	42-62		50-70		
4	17-27	17-27	28-38	28-38	13-27
2	15-25	15-25	25-35	25-35	10-17
0,500	8-16	8-16	12-22	12-22	5-12
0,063	4-6	4-6	7-9	7-9	3-6

(\*) La fracció de l'àrid que passa pel tamís de 4 mm i es retinguda pel tamís de 2 mm serà inferior al huit per cent (8%)

### A.2.6 Dotacions mínimes de lligant de les mescles bituminoses en calent

Les dotacions mínimes de betum s'expressaran sempre sobre la massa total de la mescla i seran les que s'indiquen en la taula A.3.

**Taula A.3. Dotacions mínimes de betum (tant per cent sobre la massa total de la mescla)**

Tipus de capa	Tipus de mescla	Dotació mínima (% s/m)
Trànsit	PA 11	4,30
	BBTM 11 B M	4,75
	BBTM 8 B M	4,75
	BBTM 11 A F	5,20
	BBTM 8 A F	5,20
	AC 16 surf D	4,55
	AC 22 surf D	4,55
	AC 16 surf S	4,55
Intermèdia	AC 22 surf S	4,55
	AC 22 bin D	3,85
	AC 22 bin S	3,85
	AC 32 bin S	3,85
	AC 22 bin G	3,85
	AC 32 bin G	3,85
Base	AC 22 bin 15/25 MAM	5,00
	AC 32 base S	3,40
	AC 22 base G	3,40
	AC 32 base G	3,40
	AC 22 base 15/25 MAM	5,00

### A.2.7 Característiques exigibles a l'àrid gruixut

Per als àrids gruixuts utilitzats en la capa de trànsit s'exigirà un coeficient de poliment accelerat mínim determinat segons el procediment descrit en la norma UNE-EN 1097-8. Els valors que s'han d'exigir seran els següents: major o igual a 56 per a la categoria de trànsit pesant T00; major o igual a 50 per a les categories de trànsit pesant T0 a T22; major o igual a 44 per a la resta de categories de trànsit pesant i per a vorals.

## A.2.8 Criteris bàsics de caracterització de propietats de les mescles bituminoses en calent

Els formigons bituminosos (AC) i els formigons bituminosos per a capes de poc gruix (BBTM) es caracteritzaran en funció de la proporció de buits en mescla, de la sensibilitat a l'acció de l'aigua i de la resistència a les deformacions plàstiques. Per la seua banda, les mescles poroses (PA) es caracteritzaran en funció de la proporció de buits en mescla i de la sensibilitat a l'acció de l'aigua.

En relació amb els buits en mescla s'exigiran els mateixos valors recollits en els articles 542 o 543, segons corresponga, del PG-3. Les provetes dels formigons bituminosos del tipus AC16 i AC22 es compactaran per impactes per mitjà de 75 colps per cara segons el procediment descrit en la norma UNE-EN 12697-30; les provetes de les mescles dels tipus BBTM i PA es compactaran segons el mateix procediment, però per mitjà de 50 colps per cara; finalment, per a les mescles del tipus AC32 se seguirà el procediment de compactació per vibració descrit en la norma UNE-EN 12697-32, i s'utilitzarà un temps de vibració de cent vint segons (120 s).

Per a valorar la sensibilitat a l'aigua (norma UNE-EN 12697-12), s'utilitzarà la resistència conservada (relació percentual entre la resistència de provetes després d'immersió en aigua -entre 68 i 72 h a 40 °C- i la de provetes que no han estat en aigua) mesura l'assaig de tracció indirecta a 15 °C (norma UNE-EN 12697-23). Les provetes s'hauran de fabricar en tots els casos, excepte per a les mescles del tipus AC32, per mitjà de 50 colps per cara segons el procediment de compactació per impactes descrit en la norma UNE-EN 12697-30; per a les mescles del tipus AC32, se seguirà el procediment de compactació per vibració descrit en la norma UNE-EN 12697-32, i s'aplicarà un temps de vibració de huitanta segons (80 s). Les resistències conservades obtingudes hauran de superar en tot tipus de mescles el huitanta per cent (80%).

La resistència a les deformacions plàstiques de les mescles dels tipus AC i BBTM s'avaluarà per mitjà de l'assaig de pista de laboratori descrit en la norma UNE-EN 12697-22; entre les opcions previstes en esta norma s'utilitzaran el dispositiu xicotet, el procediment B en aire, una temperatura de 60 °C i l'aplicació de càrrega durant deu mil (10.000) cicles. Les provetes hauran d'haver sigut compactades segons la norma UNE-EN 12697-33, amb el dispositiu de corró d'acer.

En les mescles d'alt mòdul (AC 22 MAM) es verificarà que el mòdul dinàmic a 20 °C, determinat segons l'annex C de la norma UNE-EN 12697-26, és superior a 11.000 MPa.

Per a les mescles poroses (PA) es valorarà l'escorriment del lligant segons la norma UNE-EN 12697-18. A més, per a estes mescles es mantenen les prescripcions actuals recollides en el PG-3 sobre la limitació de pèrdua de partícules a 25 °C, que es valorarà segons el procediment descrit en la norma UNE-EN 12697-17.

## **B VALIDACIÓ DEL DEFLECTÒMETRE D'IMPACTE PER A LA CARACTERITZACIÓ D'ESPLANADES I CAPES GRANULARS**

### **B.1 Introducció**

L'esplanada, o més generalment el seu fonament, té una importància decisiva en el comportament del ferm, que depén, en gran manera, de les característiques dels sòls sobre els quals es recolza.

D'altra banda, una de les missions de la secció de ferm és la distribució de les càrregues de trànsit a través de les diferents capes que la formen, amb l'objectiu que les tensions que arriben al suport d'esta siguen prou reduïdes com perquè no es produïsquen deformacions permanents que acabarien reflectint-se en el trànsit. Per tant, la qualitat dels materials del fonament del ferm, i de la seua posada en obra, influïxen de manera determinant no sols en les característiques dels materials que recolzen sobre este, sinó també en els gruixos definitius de les capes.

En general, per a un mateix nivell de sol·licitacions de trànsit, una major capacitat portant del fonament del ferm suposa que els gruixos de les diferents capes de la secció siguen més reduïts respecte als que seria necessari disposar sobre esplanades d'inferior categoria. D'altra banda, si el ferm s'ha dimensionat suposant una determinada capacitat de suport del fonament, i per diversos motius, no s'haja pogut arribar a esta en obra, la vida del ferm minvarà significativament.

També en les capes de base de tot-u artificial, amb funció eminentment resistent, per a arribar a esta funció, és imprescindible aconseguir una elevada compacitat després de la posada en obra.

Per tant, l'avaluació quantitativa de la capacitat de suport del fonament del ferm, i del grau de compactació de les capes granulars, mitjançant la realització d'assajos, és imprescindible. Generalment, el mètode utilitzat, i prescrit en les diferents normatives de fers, és l'assaig de càrrega amb placa; estos assajos, a pesar de ser d'utilització pràcticament universal i presentar correlacions empíriques amb el comportament del fonament, tenen l'inconvenient de ser extremadament lents (cosa que limita el nombre d'assajos realitzables, sense interferència amb el progrés normal de l'obra, i precisió de la caracterització espacial de l'esplanada), a més del fet que no simulen l'aplicació de les càrregues reals del trànsit.

A fi de mitigar els inconvenients que l'assaig de càrrega amb placa presenta, amb motiu dels treballs de redacció de la Norma de Seccions de Ferm de la Comunitat Valenciana s'han desenvolupat assajos de validació del deflectòmetre d'impacte per a la caracterització d'esplanades i capes granulars, i per a l'avaluació de la seua capacitat de



suport. La metodologia de treball, així com els resultats dels dits assajos, s'exposen en este annex.

## **B.2 El deflectòmetre d'impacte**

El deflectòmetre d'impacte és un equip amb el qual es pot avaluar la capacitat estructural d'un ferm, o la capacitat de suport d'una esplanada o capa granular, de manera no destructiva.

L'assaig consistix en l'aplicació d'una càrrega al terreny (o ferm), per mitjà d'un impuls generat per una massa que deixa caure des d'una alçària determinada sobre un sistema amortidor, que, al mateix temps, la transmet cap a una placa circular que es recolza sobre la superfície assajada. El seu objectiu és simular el pas d'un eix d'un vehicle pesant carregat, per a mesurar la resposta del terreny davant de l'aplicació de la dita sol·licitació. Coneixent la càrrega aplicada, la resposta del fonament, i la naturalesa i l'estructura d'este, es poden deduir les tensions i les deformacions en cada punt.

El vehicle portador o remolcador de l'equip d'assaig es deté en la secció que cal auscultar, i se situa la placa de suport sobre el punt desitjat. La placa i els sensors de deflexions se situen en la superfície del paviment amb la configuració especificada. La massa s'eleva fins a l'alçària requerida segons el nivell de càrrega que s'ha d'aplicar. Quan la massa cau, la força és distribuïda per la placa sobre la superfície del ferm; en eixe moment, s'enregistra el moviment vertical (deflexió) de la dita superfície sota els sensors, per mitjà de la instrumentació i els equips electrònics i informàtics adequats. Generalment, en un mateix punt es realitzen diversos assajos aplicant diferents nivells de càrrega, modificant l'alçària de caiguda de la massa.

Per al desenvolupament dels treballs es disposà d'un deflectòmetre d'impacte model KUAB-FWD 50, configurat per a generar càrregues nominals de 49 kN (5.000 kg) i 64 kN (6.500 kg), obtingudes en deixar caure una doble massa des d'una alçària determinada sobre una placa circular de 150 mm de radi; això equival a aplicar una pressió de contacte sobre el ferm de 0,694 i 0,902 MPa, respectivament. L'equip enregistra la deflexió (deformació vertical de la superfície del ferm) sota el punt d'aplicació de la càrrega i en altres sis punts situats a una distància radial d'este de 20, 30, 45, 60, 90 i 120 cm, respectivament, per mitjà d'uns sensors tipus LVDT, la qual cosa permet obtindre el denominat bol de deflexió o línia d'influència de la deformada.

## **B.3 La caracterització mitjançant deflectòmetre d'impacte**

Un dels problemes de l'assaig de càrrega amb placa és la lentitud d'este; en condicions òptimes, el rendiment aproximat d'un equip és, aproximadament, de 8 assajos en una jornada. Això significa que, assajant un punt cada quilòmetre, en una jornada s'hauran

assajat uns 8 km d'esplanada. Per a caracteritzar l'esplanada amb precisió, un punt en un quilòmetre és estadísticament insuficient, per tant seria desitjable augmentar la freqüència espacial de mostratge, diguem-ne, fins als 10 assajos cada quilòmetre (un punt cada 100 m). D'esta manera, l'equip de càrrega amb placa auscultaria una distància inferior al quilòmetre cada jornada de treball.

El deflectòmetre d'impacte permet rendiments molt majors, de l'orde de 30 punts d'assaig per hora; és a dir, aproximadament, assajant cada 100 m per a una caracterització representativa de l'esplanada, uns 24 km en una jornada de treball en condicions normals. Amb operadors prou experimentats, estos rendiments poden ser fàcilment superiors.

Com ja s'ha indicat anteriorment en este document, el deflectòmetre d'impacte, per mitjà de l'aplicació d'una càrrega de magnitud definida, enregistra la deflexió obtinguda sota el punt d'aplicació de la càrrega i en altres sis punts situats a una distància radial d'este de 20, 30, 45, 60, 90 i 120 cm, respectivament.

La càrrega aplicada, gràcies a la configuració de la placa que transmet l'impacte al terreny, és assimilable a una càrrega flexible circular, de radi  $a$  i pressió uniforme  $q$ . Suposant que la càrrega s'aplica sobre un semiespai indefinit de mòdul d'elasticitat  $E$  i coeficient de Poisson  $\nu$ , la deflexió en la superfície, sota el punt d'aplicació de la càrrega, serà (equació de Boussinesq):

$$d_0 = \frac{2 \cdot q \cdot a \cdot (1 - \nu^2)}{E} \rightarrow E = \frac{2 \cdot q \cdot a \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

En general, es pot suposar un coeficient de Poisson de 0,35 per al massís semiindefinit, per la qual cosa per a cada impacte del deflectòmetre, la resta de les variables seran conegudes, i es podrà determinar el mòdul  $E$  d'este.

Si es realitzen assajos amb deflectòmetre cada 100 m (o, fins i tot, cada 50 m si el procés normal de l'obra ho permet), és possible establir per a cada quilòmetre un mòdul d'elasticitat mitjà ( $E_m$ ) i la desviació típica d'este ( $E_s$ ), de forma que es pot adoptar un mòdul característic ( $E_{ck}$ ), estadísticament representatiu, de la forma següent:

$$E_{ck} = E_m - E_s$$

L'objectiu del treball de validació abordat en la Norma de Ferms de la Comunitat Valenciana és establir, a la vista dels resultats obtinguts en este, els valors de referència exigits, bé de mòduls d'elasticitat, bé de deflexió tant per a capes granulars com per a esplanades en les obres de carreteres.

## **B.4 Consideracions addicionals per a la caracterització de capes granulars amb deflectòmetre d'impacte**

Respecte als assajos habituals sobre ferss flexibles, amb l'objectiu de definir la millor solució de rehabilitació estructural, és necessari assenyalar les consideracions següents quan l'assaig es realitza sobre capes granulars:

- És imprescindible efectuar un impacte previ, denominat d'assentament, abans dels impactes d'assaig. Si bé este impacte és important també en els assajos sobre paviments bituminosos, en capes granulars o esplanades, habitualment menys uniformes en la seua superfície, és decisiu, de manera que en els impactes successius al d'assentament es poden enregistrar valors de la deflexió sota el punt d'aplicació de la càrrega de l'orde del 35% inferior a l'enregistrada en l'inicial (en paviments de mescla bituminosa, les diferències suposen a penes el 5%).
- És habitual enregistrar comportaments erràtics en els sensors més allunyats del punt d'aplicació de la càrrega. Evidentment, no podem esperar que un medi granular, constituït per partícules discretes, es comporte exactament com un continu ideal de la mecànica clàssica.
- En les esplanades més dèbils, de categories més baixes, és possible que s'enregistren deflexions massa altes; en este cas, s'hauria de reduir la càrrega aplicada.
- Encara que es realitzen les suposicions habituals, que consideren el medi com un massís semiindefinit elàstic, homogeni i isòtrop, la realitat és que les deflexions en materials granulars i esplanades depenen d'altres paràmetres com són el grau de compactació, el contingut d'humitat, l'angle de fregament intern dels materials, la cohesió d'estos, etc. Per tant, estos paràmetres han de ser considerats a l'hora d'establir els mòduls elàstics de referència.

## **B.5 Organització del treball**

Com s'ha comentat prèviament, el principal objecte del procés és obtindre la validació dels deflectòmetres d'impacte com a sistema de control alternatiu a la realització d'assajos de càrrega amb placa.

Encara que l'ús més convencional del deflectòmetre és l'anàlisi sobre capes de trànsit tant asfàltiques com de formigó ja existents, les particularitats de l'equip KUAB i les de qualsevol tipus de deflectòmetre d'impacte fan que siga totalment factible realitzar mesuraments directament sobre capes granulars o de terra, ja que en els seus orígens a Suècia va ser utilitzat amb esta funció. Les dites particularitats són: un plat flexible, segmentat en quatre seccions, cada una de les quals rep un quart de la càrrega, per tant, en

definitiva, permet acomodar-se a les irregularitats del terreny i repartir uniformement la càrrega; l'altra, és que els sensors que mesuren la deformació són sismòmetres (LVDT) que permeten llegir deflexions de fins a 5 mm.

En este treball, els assajos es van realitzar sobre superfícies acabades (compactades i refinades) d'esplanada, de tot-u artificial i esplanades estabilitzades amb ciment. Les campanyes d'assajos s'han dut a terme en carreteres pertanyents a la Generalitat, a les diputacions de Castelló, València i Alacant i al Ministeri de Foment, que estaven en fase d'execució en les dates en què es van desenvolupar els assajos.

Les campanyes d'assajos es van dur a terme des del 25 de juny de 2007 fins al 8 de desembre de 2007, al llarg de les tres províncies de la Comunitat Valenciana.

S'han desenvolupat assajos en un total de 16 carreteres, algunes de les quals han sigut assajades dos vegades, tant sobre l'esplanada com, posteriorment, sobre capa granular. Esta doble realització d'assajos hauria sigut un objectiu desitjable en totes estes, però la naturalesa de l'obra, les seues dificultats intrínseques i els ritmes de treball d'estes han fet que no sempre haja sigut possible la seua consecució.

Un dels reptes més complexos en el desenvolupament de la present investigació des del punt de vista logístic va ser la planificació dels assajos en cada una de les obres i la coordinació dels equips (deflectòmetre i placa de càrrega), amb els ritmes de treball d'estes, que en la major part d'ocasions van patir retards d'acord amb les dates previstes per factors de diversa índole, com les condicions atmosfèriques adverses, cosa que va obligar a un reajustament continu del calendari de treballs.

Respecte a les condicions de desenvolupament dels assajos de camp, estos s'han realitzat sempre en el mateix dia i lloc per als dos tipus de control (deflectometria i càrrega amb placa).

Per a l'assaig de càrrega amb placa es va utilitzar la placa de 30 cm de diàmetre, i el seu assaig es va realitzar d'acord amb la norma NLT 357/98. En el cas del deflectòmetre, la seqüència d'actuació en cada punt analitzat va ser la següent: un primer assaig d'assentament, i, després d'este, es duen a terme assajos amb dos càrregues de 49 i de 64 kN, respectivament.

Cada dia de treball s'anoten les dades següents, amb la finalitat d'obtindre una millor caracterització del tram d'estudi:

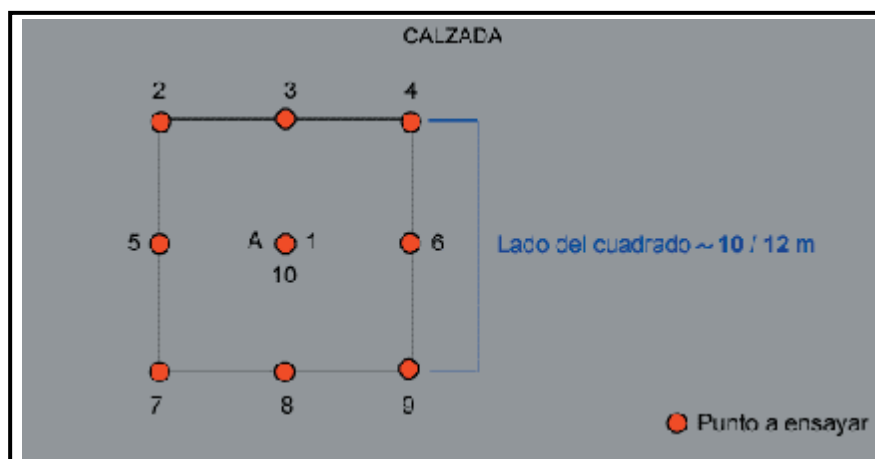
- Nom de l'obra i identificació de la carretera.
- Tipus de superfície assajada: esplanada, esplanada estabilitzada o tot-u.
- Dades sobre el material subjacent, i sol·licitud de tota la informació possible respecte d'això, de manera que permeta una bona caracterització d'este.
- Data (dia, mes i any).

- Hora d'inici i d'acabament.
- Condicions meteorològiques. Descripció qualitativa i quantitativa (sempre que ha sigut possible) de les condicions meteorològiques prèvies al dia de l'assaig, així com la temperatura ambient en el moment de realitzar l'assaig corresponent.
- Nom i tasca de les persones que hi participen, amb especial atenció a:
  - Operador responsable del deflectòmetre d'impacte.
  - Operador responsable de la placa de càrrega.
  - Referència física dels llocs d'assaig: si està en desmunt o en terraplé, orografia de la zona, cultius en les zones limítrofes, etc.).
  - PK d'obra o una altra referència vàlida.
  - Coordenades GPS de cada punt d'assaig.
  - Reportatge fotogràfic amb càmera digital de cada zona d'assaig.

A més, es va realitzar un reportatge fotogràfic complet de cada un dels trams analitzats i es van incloure imatges dels equips i imatges dels assajos, i es va fer un reportatge global de tota la campanya.

Abans de la realització de l'assaig de càrrega amb placa es van demanar les dades del camió utilitzat per este:

- Tipus de camió (marca i model).
  - Verificació mitjançant bàscula contrastada de la càrrega de l'eix i de la pressió dels pneumàtics.
  - Matrícula i nom del propietari o conductor.
  - La metodologia utilitzada per a les campanyes simultànies de deflectòmetre i placa de càrrega va ser la següent:
1. Se selecciona el punt d'assaig de càrrega amb placa d'acord amb els criteris de la norma NLT 357/98; la selecció dels punts que s'han d'assajar és presa pel tècnic responsable de la càrrega amb placa i en funció de les condicions particulars de l'obra en qüestió.
  2. Sobre la zona del punt seleccionat es marca físicament un quadrat, aproximadament, de 10/12 m de costat.
  3. S'organitza la realització dels assajos amb deflectòmetre d'impacte d'acord amb el croquis i procediment següents:



- En el punt (1) primer assaig amb deflectòmetre d'impacte.
- Després, en el punt (A) assaig amb placa de càrrega.
- Els punts 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9, assaig amb deflectòmetre d'impacte.
- En el punt (10) últim assaig de nou amb deflectòmetre d'impacte.

El primer punt d'assaig del deflectòmetre està, aproximadament, en el centre de la retícula i és el punt on immediatament després es realitzarà l'assaig de càrrega amb placa. L'assaig de càrrega amb placa és un procés car, lent i molest, que pràcticament necessita 1 hora per punt assajat. Mentre este es du a terme en el centre del quadrat, el deflectòmetre realitza 8 assajos més en els punts situats en els cantons i els centres dels costats del quadrat (vegeu el croquis). Una vegada acabat l'assaig de placa es tornarà a assajar el punt central amb deflectòmetre per a poder contrastar l'efecte que exercix la placa sobre el terreny.

Per tant, sempre que les dimensions de la plataforma que s'han d'analitzar ho han permés, per cada assaig de càrrega amb placa, s'han realitzat 10 assajos amb deflectòmetre d'impacte atenent la metodologia prèviament explicada. En algunes ocasions, on l'amplària de la carretera que s'ha d'assajar no permetia maniobrar als equips d'auscultació, s'han reduït les dimensions de la malla o ha sigut necessari analitzar els punts en línia, amb la qual cosa el nombre de punts assajats amb el deflectòmetre pot haver disminuït lleugerament.

Per a definir l'equidistància entre els punts que s'han d'assajar, amb la finalitat d'obtindre una millor caracterització dels sòls i capes granulars analitzades, i disminuir el risc de defectes ocults, es va utilitzar el criteri següent en funció de la longitud dels trams:

- En els trams la longitud dels quals siga inferior a 3.000 m, els assajos es van realitzar cada 50 m. Este valor és orientatiu i ha pogut variar en funció de les condicions *in situ* i de les limitacions del tram en si.

- En els trams de longitud major o igual a 3.000 m, els assajos van presentar una equidistància de 150 m, i han pogut variar lleugerament amb el criteri del tècnic responsable atenent les condicions pròpies del tram.

En la taula B.1 es pot observar la gran quantitat de punts d'assaig al llarg de toda la campanya, així com el nombre d'anàlisis dutes a terme pel deflectòmetre en els diferents tipus de material:

**Taula B.1. Relació de carreteres assajades**

Carretera	Titularidad	Puntos de ensayo	Nº Ensayos	Tipo de material
Nº1	Fomento	29	164	Suelo estabilizado
Nº2	Fomento	6	23	Suelo estabilizado
Nº3	Fomento	25	133	Suelo estabilizado
Nº4	Fomento	5	20	Suelo estabilizado
Nº5	Fomento	6	48	Suelo estabilizado
Nº6	Consellería	15	77	Suelo seleccionado
Nº7	Consellería	5	26	Suelo seleccionado
Nº8	Diputación	47	378	Suelo seleccionado
Nº9	Consellería	15	148	Suelo seleccionado
Nº10	Diputación	16	75	Suelo seleccionado
Nº11	Consellería	42	233	Suelo seleccionado
Nº12	Consellería	5	20	Zahorra artificial
Nº13	Diputación	46	459	Zahorra artificial
Nº14	Diputación	69	477	Zahorra artificial
Nº15	Consellería	26	127	Zahorra artificial
Nº16	Fomento	62	232	Zahorra artificial
<b>Total</b>		<b>419</b>	<b>2.640</b>	

De tots els assajos realitzats s'han guardat les dades brutes, incloses totes les lectures dels comparadors de la placa de càrrega. Tots estos formen part d'un sistema d'arxivament en el qual s'han sotmés a una fase de depuració per al posterior tractament analític i estadístic.

## **B.6 Resultats obtinguts**

En les pàgines següents es resumixen els resultats obtinguts en la campanya d'assajos realitzada conjuntament amb placa de càrrega i deflectòmetre d'impacte.

En primer lloc, s'estudien els valors enregistrats pel deflectòmetre d'impacte. A este respecte, en la taula B.2 es recullen els valors mitjans dels assajos per tipus de capa.

**Taula B.2. Resultats obtinguts per tipus de material (valors mitjans)**

Tipo de material	Nº de ensayos	Carga media [kN]	Módulo medio [MPa]	Deflexión media [µm]
Suelo estabilizado	388	52,0	733	284
Suelo seleccionado	937	52,2	269	692
Zahorra artificial	1.315	52,4	377	528

Amb independència de la interpretació del valor absolut dels mòduls i les deflexions obtingudes, es pot comprovar la sensibilitat de l'equip als diferents tipus de materials assajats. L'equip detecta perfectament la diferència de capacitat portant del sòl seleccionat respecte a la del sòl estabilitzat.

Un segon nivell d'anàlisi és l'estudi de la correlació entre els assajos de càrrega amb placa i els assajos amb deflectòmetre d'impacte.

A este respecte, s'han elaborat les taules i els gràfics de correlació  $E_{v2} - E_o$  entre els diversos paràmetres obtinguts en cada tipus d'assajos, i es treballa sempre amb valors mitjans. Les dites taules es poden consultar en l'annex del present document.

## **B.7 Comparació entre diferents tipus de deflectòmetre**

Els assajos de deflexió duts a terme per AEPO, SA, Ingenieros Consultores, en les diferents carreteres de la Comunitat Valenciana que formen part del present annex van ser realitzats amb un deflectòmetre d'impacte model KUAB-FWD 50, les característiques del qual ja han sigut detallades en l'apartat B.2.

Per a comprovar que els resultats obtinguts són igualment vàlids, independentment del model o marca de deflectòmetre utilitzat, sempre que l'aparell estiga calibrat correctament, es van realitzar uns quants trams de comparació en els quals es van mesurar simultàniament les deflexions amb el mencionat KUAB, així com amb un altre deflectòmetre de diferent marca i model.

Els gràfics que s'adjunten en l'annex mostren que no hi ha diferències significatives entre les deflexions enregistrades pels diferents tipus d'equips, així com tampoc en els mòduls obtinguts.

Per tant, resulta vàlid per a la caracterització de capes granulars tot tipus de deflectòmetre que estiga ben calibrat amb independència de la seua marca o model.



## B.8 Resum i conclusions

L'ampli treball realitzat de validació del deflectòmetre com a instrument apte per a la caracterització tant de capes granulars com d'esplanades és un dels objectius que s'han inclòs en la redacció de la Norma de Seccions de Ferm de la Comunitat Valenciana.

Establida la correlació entre el deflectòmetre d'impacte i la placa de càrrega, es van fixar, a la vista dels resultats obtinguts, els valors de referència exigits, bé de mòduls d'elasticitat, bé de deflexió tant per a capes granulars com per a esplanades en les obres de carreteres.

Es va estudiar una correlació per cada tipus de material assajat, i es van obtenir els resultats que es poden observar en els gràfics adjunts, per a, finalment, trobar una correlació global que reculla tots els tipus de sòls analitzats. A partir de la dita correlació, que presenta un ajust de 92%, i coneixent els valors la deflexió  $d_0$  enregistrada pel deflectòmetre, es va calcular  $E_0$  (mòdul elàstic de la superfície del terreny), a partir dels quals es definixen les categories d'esplanada següents:

- E1:  $E_{0,ck} \geq 100$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E2:  $E_{0,ck} \geq 140$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E3:  $E_{0,ck} \geq 255$  MPa;  $\nu = 0,35$
- E4:  $E_{0,ck} \geq 440$  MPa;  $\nu = 0,30$

Per a poder establir la categoria de l'esplanada per mitjà del deflectòmetre d'impacte, serà preceptiva l'execució d'un impacte d'assentament, i, posterior a este, s'hauran d'efectuar, almenys, dos impactes de 49 kN en cada punt d'assaig, i es prendrà com a valor representatiu la mitjana de les deflexions obtingudes en cada un d'estos, sempre que els seus valors no diferisquen en més del 5%; en cas contrari, l'assaig no es podrà considerar vàlid.

Si no es disposa de deflectòmetre d'impacte, es podran utilitzar els mòduls de compressibilitat obtinguts en el segon cicle de càrrega d'assajos de càrrega amb placa definits en la norma NLT-357, amb els valors de referència següents:

- E1:  $E_{v2} \geq 50$  MPa.
- E2:  $E_{v2} \geq 100$  MPa.
- E3:  $E_{v2} \geq 225$  MPa.
- E4:  $E_{v2} \geq 425$  MPa.

Atés que el nombre de deflectòmetres d'impacte és ja important a Espanya i que els programes de càlcul invers són assequibles i de fàcil maneig, este sistema de control ha de tindre un gran futur al nostre país, ja que són múltiples els avantatges que presenta:

- És un instrument tècnicament útil i fiable per al control de la capacitat portant de l'esplanada i de les capes granulars.
- És molt ràpid, per la qual cosa permet assajar un nombre de punts relativament alt, i a favorix una millor caracterització de la capa que s'ha d'assajar, amb la qual cosa es disminuïx el risc de defectes ocults.
- Es pot obtindre directament el paràmetre cercat, en este cas el mòdul d'elasticitat de les capes.
- És molt més econòmic que la placa de càrrega.
- Les càrregues aplicades són dinàmiques, com les produïdes pel trànsit, i d'una magnitud semblant a estes.

## B.9 Documents annexos

### B.9.1 Resultats en sòl seleccionat

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
281,0	450,0	912,3	461,8	1,60
225,0	375,0	702,0	349,5	1,67
166,6	346,2	717,0	338,8	2,08
236,8	346,1	757,9	315,0	1,46
237,0	346,0	723,4	368,8	1,46
225,0	346,0	694,8	306,8	1,54
167,0	346,0	611,7	359,5	2,07
180,0	321,4	625,0	293,0	1,79
150,0	321,4	496,5	266,4	2,14
145,2	321,4	557,0	241,8	2,21
180,0	321,0	751,3	353,8	1,78
155,0	321,0	502,0	351,8	2,07
150,0	321,0	580,7	295,7	2,14
195,6	300,0	822,3	243,3	1,53
155,0	300,0	563,7	305,3	1,94
136,0	300,0	500,0	335,3	2,21
136,3	281,3	511,0	311,3	2,06
204,5	281,3	754,4	305,2	1,38
204,5	281,2	685,8	291,0	1,38
166,6	281,2	715,5	272,5	1,69
225,0	281,0	781,0	356,1	1,25
214,0	265,0	1 052,3	280,2	1,24
180,0	265,0	761,2	307,3	1,47
187,5	264,7	817,5	278,5	1,41
166,6	264,7	632,8	253,7	1,59
160,7	264,7	803,0	338,0	1,65
150,0	264,7	636,6	239,5	1,76
145,1	264,7	671,3	256,3	1,82
132,4	264,7	576,8	298,8	2,00
180,0	250,0	812,7	265,3	1,39
173,1	250,0	663,3	289,2	1,44
155,2	250,0	939,5	234,7	1,61
155,0	250,0	656,3	226,5	1,61
141,0	250,0	809,5	346,8	1,77
140,6	250,0	512,5	237,0	1,78
132,0	250,0	497,0	233,3	1,89

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
132,0	250,0	567,8	280,3	1,89
180,0	237,0	893,8	272,9	1,32
173,0	237,0	951,5	291,4	1,37
187,5	236,8	1088,8	205,7	1,26
180,0	236,8	957,0	303,3	1,32
145,1	236,8	1 368,0	212,8	1,63
132,3	236,8	576,2	272,0	1,79
140,6	225,0	622,0	244,0	1,60
136,0	225,0	776,8	281,1	1,65
128,6	225,0	619,0	244,1	1,75
128,6	225,0	872,6	279,0	1,75
125,0	225,0	630,3	306,5	1,80
104,7	225,0	602,2	233,3	2,15
145,2	214,3	657,0	120,0	1,48
136,4	214,3	636,5	221,5	1,57
136,3	214,3	775,1	210,5	1,57
115,0	214,0	657,5	270,3	1,86
122,0	205,0	697,8	275,3	1,68
107,0	205,0	575,0	190,7	1,92
100,0	205,0	707,5	184,0	2,05
112,5	204,6	697,8	191,0	1,82
132,3	204,5	770,7	221,4	1,55
132,3	204,5	760,0	217,4	1,55
121,6	204,5	627,4	265,3	1,68
107,1	204,5	675,0	218,5	1,91
97,8	204,5	634,6	267,8	2,09
115,0	196,0	817,1	186,0	1,70
112,5	195,7	595,3	205,1	1,74
102,3	195,7	512,2	258,8	1,91
132,3	187,5	1 011,0	238,8	1,42
107,1	187,5	640,2	193,0	1,75
102,0	187,5	719,3	260,5	1,84
97,8	187,5	609,8	247,0	1,92
136,0	180,0	842,4	233,4	1,32
125,0	180,0	800,5	235,6	1,44
121,6	180,0	724,3	250,8	1,48
112,5	180,0	931,5	254,9	1,60
112,5	173,1	928,8	179,5	1,54
85,0	173,0	510,5	176,5	2,04
100,0	167,0	642,1	218,3	1,67
98,0	167,0	836,5	171,3	1,70
132,4	166,6	803,5	258,8	1,26

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
128,6	166,6	971,3	207,1	1,30
121,6	166,6	917,0	193,8	1,37
115,3	166,6	667,8	226,1	1,44
100,0	166,6	569,5	184,5	1,67
86,0	161,0	614,3	208,8	1,87
112,5	160,7	1 014,5	174,3	1,43
112,5	160,7	932,8	186,5	1,43
104,7	155,2	732,9	159,3	1,48
104,7	155,2	938,8	179,5	1,48
98,0	150,0	581,0	168,8	1,53
112,5	140,6	1028,0	217,3	1,25
76,0	136,0	711,4	164,3	1,79
56,3	107,1	585,8	153,0	1,90
47,4	93,7	540,0	97,3	1,98

### B.9.2 Resultats en tot-u artificial

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
450,0	750,0	818,5	726,0	1,67
375,0	750,0	693,8	644,7	2,00
321,4	642,8	563,3	637,0	2,00
281,2	562,5	416,5	677,0	2,00
300,0	500,0	485,3	460,3	1,67
265,0	500,0	437,0	490,8	1,89
236,8	500,0	522,4	445,3	2,11
236,8	450,0	553,9	398,0	1,90
236,8	450,0	584,4	406,4	1,90
204,5	450,0	481,3	410,3	2,20
225,0	409,1	608,6	351,8	1,82
204,5	409,1	706,1	342,5	2,00
195,6	409,1	457,2	442,8	2,09
225,0	409,0	485,9	355,6	1,82
250,0	375,0	633,0	368,8	1,50
214,3	375,0	527,8	337,0	1,75
187,5	375,0	501,4	346,5	2,00
187,5	375,0	406,8	410,1	2,00
180,0	375,0	491,7	369,2	2,08
180,0	375,0	499,5	371,8	2,08
180,0	375,0	544,3	382,3	2,08
173,1	375,0	654,5	369,3	2,17

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
264,7	346,1	555,7	378,7	1,31
250,0	346,1	484,8	311,3	1,38
214,3	346,1	472,0	387,1	1,62
195,7	346,1	490,3	369,8	1,77
195,6	346,1	403,6	342,8	1,77
173,0	346,1	463,6	347,5	2,00
166,6	346,1	524,3	429,0	2,08
160,7	346,1	527,0	335,4	2,15
237,0	346,0	385,5	347,0	1,46
214,0	346,0	396,8	359,7	1,62
214,0	346,0	437,5	384,0	1,62
187,5	346,0	518,0	417,0	1,85
214,2	321,4	483,8	290,6	1,50
204,5	321,4	546,0	348,2	1,57
204,5	321,4	473,3	375,7	1,57
195,6	321,4	800,0	333,5	1,64
195,6	321,4	551,3	342,3	1,64
187,5	321,4	593,8	333,9	1,71
187,5	321,4	565,8	366,4	1,71
180,0	321,4	564,8	416,3	1,79
173,1	321,4	1 122,5	362,0	1,86
150,0	321,4	512,8	364,2	2,14
196,0	321,0	464,1	292,5	1,64
180,0	321,0	513,5	347,2	1,78
150,0	321,0	425,2	365,5	2,14
205,0	300,0	853,5	357,8	1,46
195,6	300,0	494,1	386,0	1,53
173,1	300,0	504,1	298,4	1,73
173,1	300,0	480,8	340,0	1,73
167,0	300,0	365,5	306,0	1,80
166,7	300,0	463,0	347,8	1,80
160,7	300,0	478,5	312,3	1,87
155,2	300,0	634,8	309,1	1,93
155,2	300,0	514,5	374,8	1,93
150,0	300,0	624,4	294,0	2,00
150,0	300,0	483,5	353,8	2,00
145,1	300,0	506,6	344,5	2,07
204,5	281,2	459,3	367,2	1,38
166,6	281,2	431,5	320,0	1,62
173,0	281,2	426,6	258,4	1,63
160,7	281,2	462,6	363,1	1,75
155,2	281,2	516,0	317,8	1,81

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
187,5	281,0	560,6	312,5	1,50
167,0	265,0	638,8	291,3	1,59
136,3	264,7	583,0	298,5	1,94
155,1	250,0	464,6	326,6	1,61
150,0	250,0	434,3	304,3	1,67
145,2	250,0	465,6	242,5	1,72
121,6	250,0	454,8	280,8	2,06
121,6	236,8	589,1	217,3	1,95
125,0	225,0	745,8	263,3	1,80
112,5	225,0	506,5	308,8	2,00
136,3	214,2	568,3	282,8	1,57
125,0	214,2	525,9	271,7	1,71
129,0	205,0	205,0	200,3	1,59
112,5	204,5	231,5	233,8	1,82
100,0	195,7	265,5	216,3	1,96
121,6	187,5	262,7	249,3	1,54
86,5	173,0	249,0	205,0	2,00
77,6	155,2	379,7	153,0	2,00

### B.9.3 Resultats en sòl estabilitzat

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
1 125,0	1 500,0	113,0	1512,3	1,33
750,0	1 500,0	141,8	1214,3	2,00
900,0	1 125,0	186,0	969,5	1,25
900,0	1 125,0	173,3	997,8	1,25
750,0	1 125,0	184,5	929,3	1,50
643,0	1 125,0	186,3	928,1	1,75
642,9	900,0	224,9	787,2	1,40
563,0	900,0	216,5	775,5	1,60
450,0	900,0	238,0	884,8	2,00
409,1	900,0	161,0	1062,8	2,20
562,5	750,0	198,8	852,3	1,33
562,5	750,0	207,1	821,5	1,33
500,0	750,0	204,3	831,5	1,50
500,0	750,0	231,7	773,1	1,50
450,0	750,0	198,8	922,8	1,67
450,0	750,0	183,0	942,0	1,67
450,0	750,0	233,0	727,3	1,67
409,1	750,0	213,1	832,9	1,83
346,1	750,0	270,0	626,8	2,17

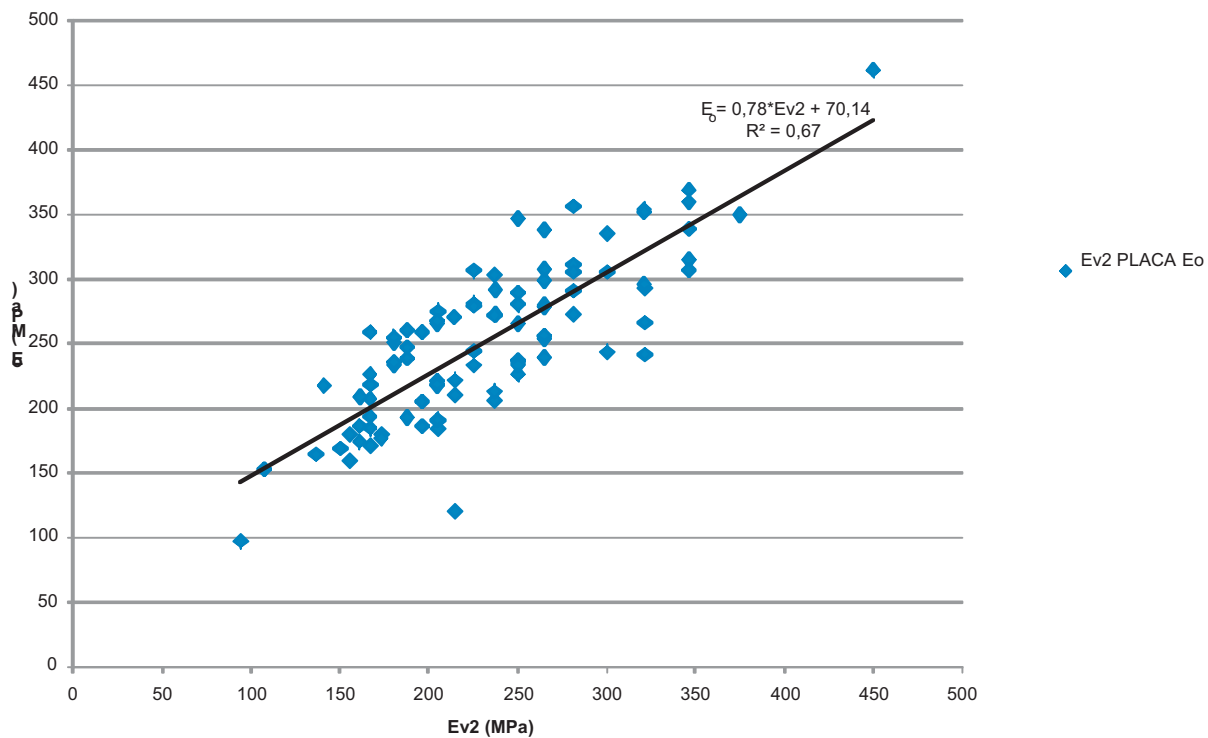
$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexió [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
346,1	750,0	208,5	822,5	2,17
500,0	643,0	332,0	547,4	1,29
375,0	643,0	194,3	891,6	1,71
346,0	643,0	271,2	636,9	1,86
500,0	642,9	251,6	681,0	1,29
500,0	642,9	217,7	807,1	1,29
450,0	642,9	236,5	743,0	1,43
375,0	642,9	312,3	546,0	1,71
500,0	642,8	218,8	812,6	1,29
300,0	642,8	288,8	677,3	2,14
300,0	642,8	271,8	665,8	2,14
450,0	562,5	282,8	599,5	1,25
364,1	562,5	294,5	577,5	1,54
346,0	562,5	389,0	442,3	1,63
300,0	562,5	246,3	690,3	1,88
264,7	562,5	253,8	689,3	2,13
375,0	500,0	285,5	606,3	1,33
375,0	500,0	294,8	589,0	1,33
300,0	500,0	252,8	671,5	1,67
250,0	500,0	400,5	438,3	2,00
346,1	450,0	321,5	547,0	1,30
346,0	450,0	330,7	561,1	1,30
300,0	450,0	404,3	453,8	1,50
281,2	450,0	412,3	411,8	1,60
236,9	375,0	576,0	306,3	1,58

#### B.9.4 Gràfics

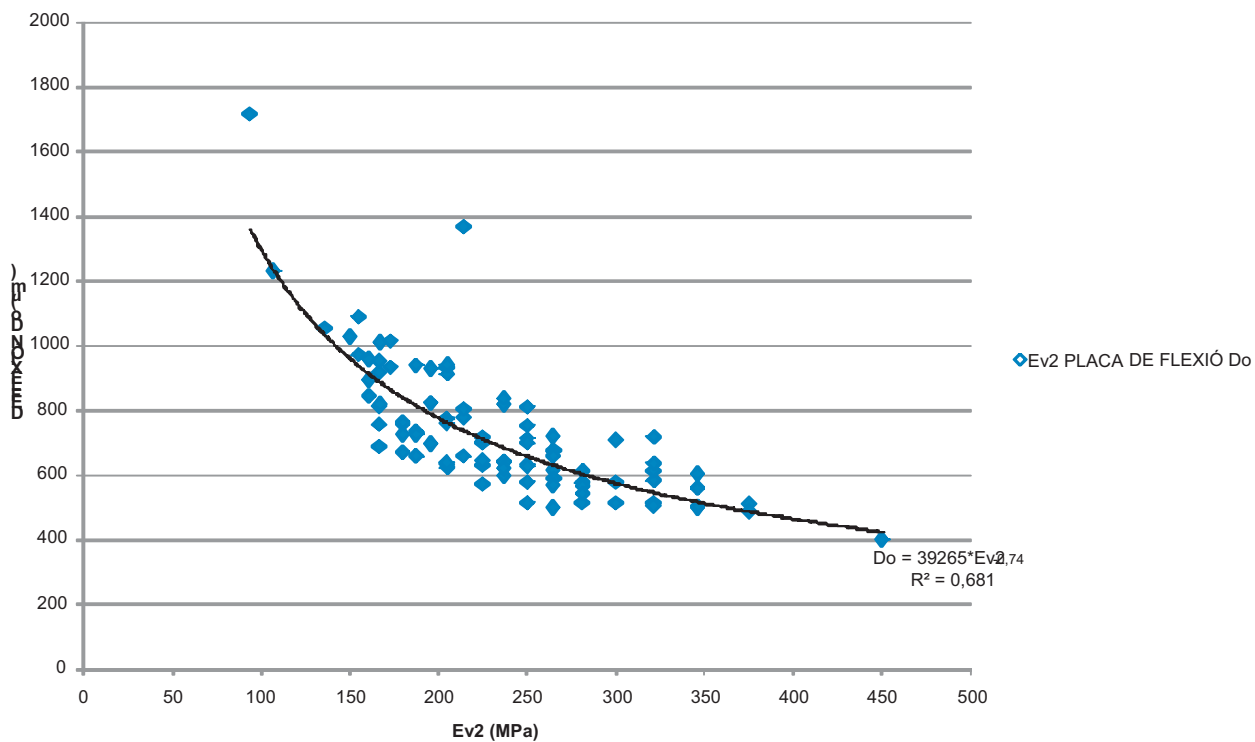
Els gràfics que s'adjunten a continuació recullen la comparativa entre els dos assajos per a cada tipus de material, l'equació de correlació obtinguda i el valor de l'estadístic  $R^2$ , que ens indica el grau d'ajustament del model.

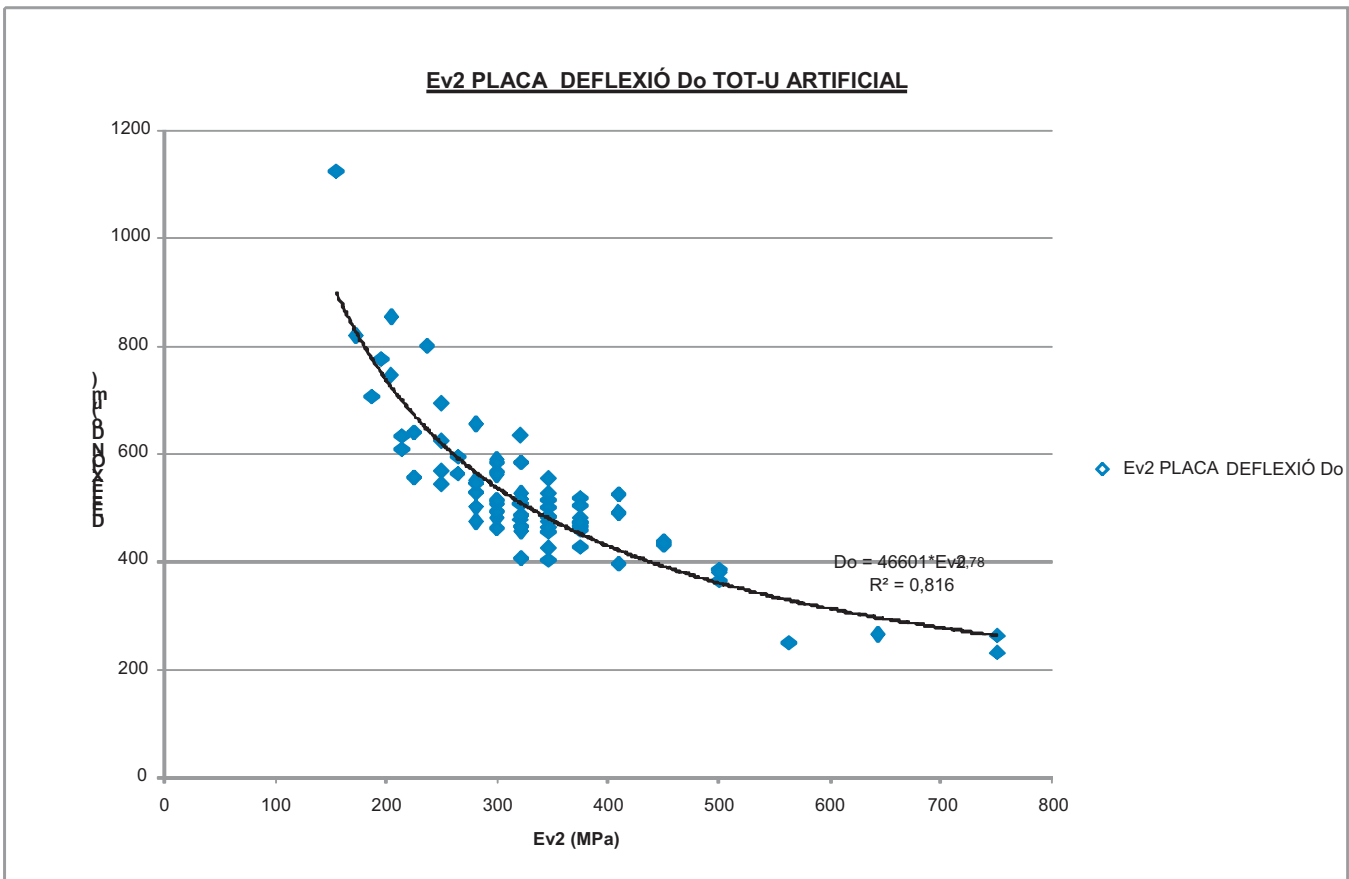
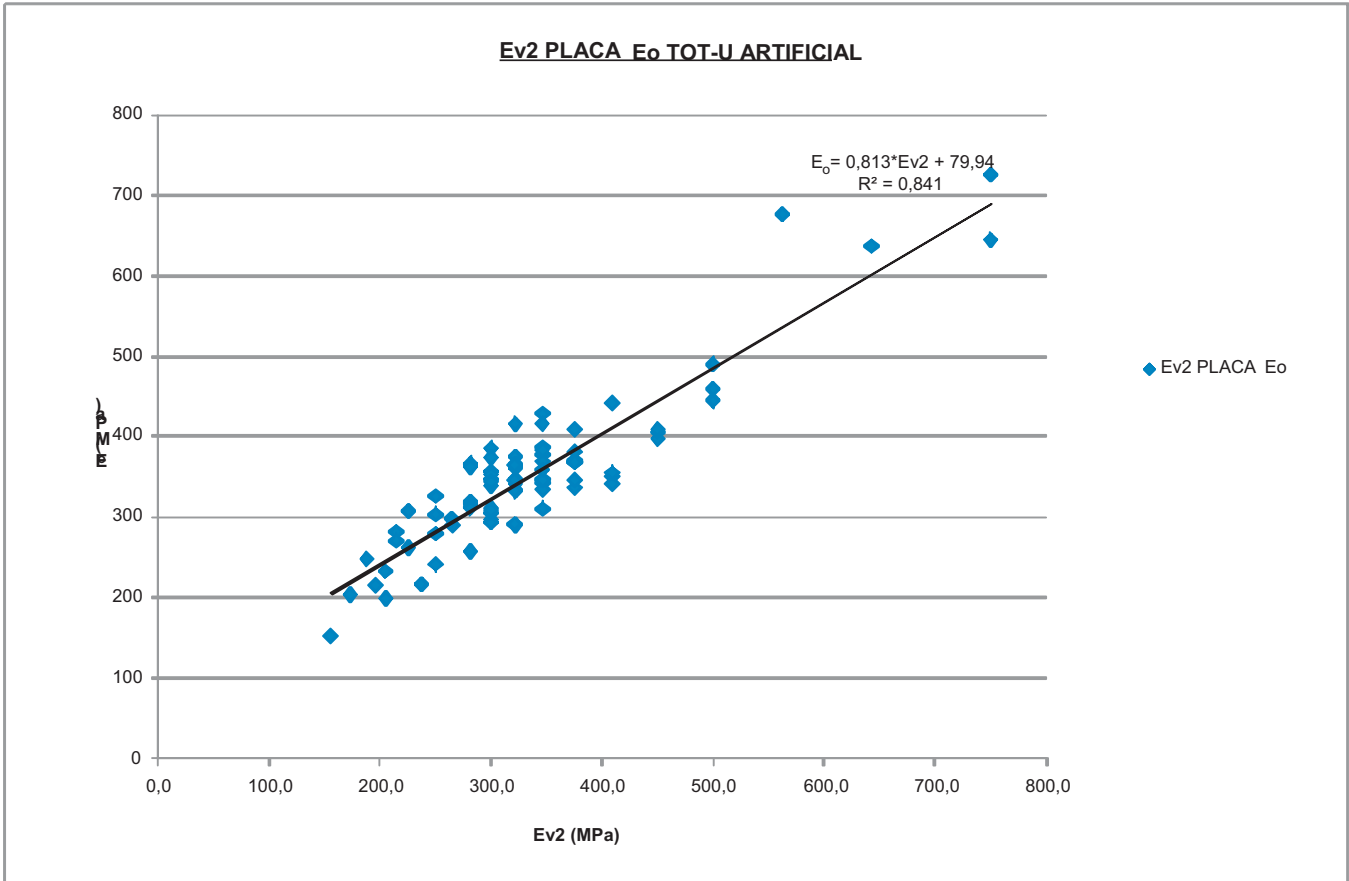


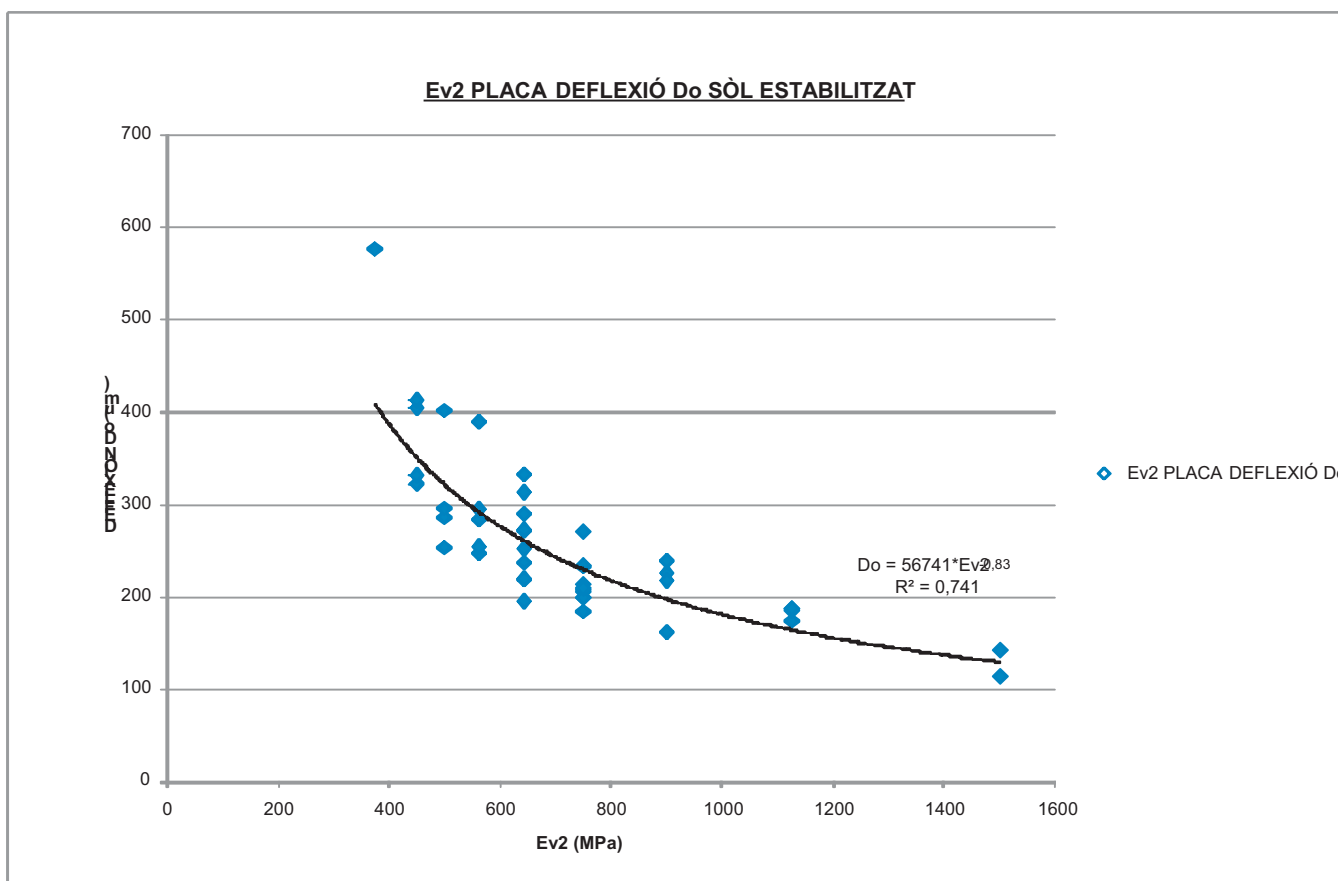
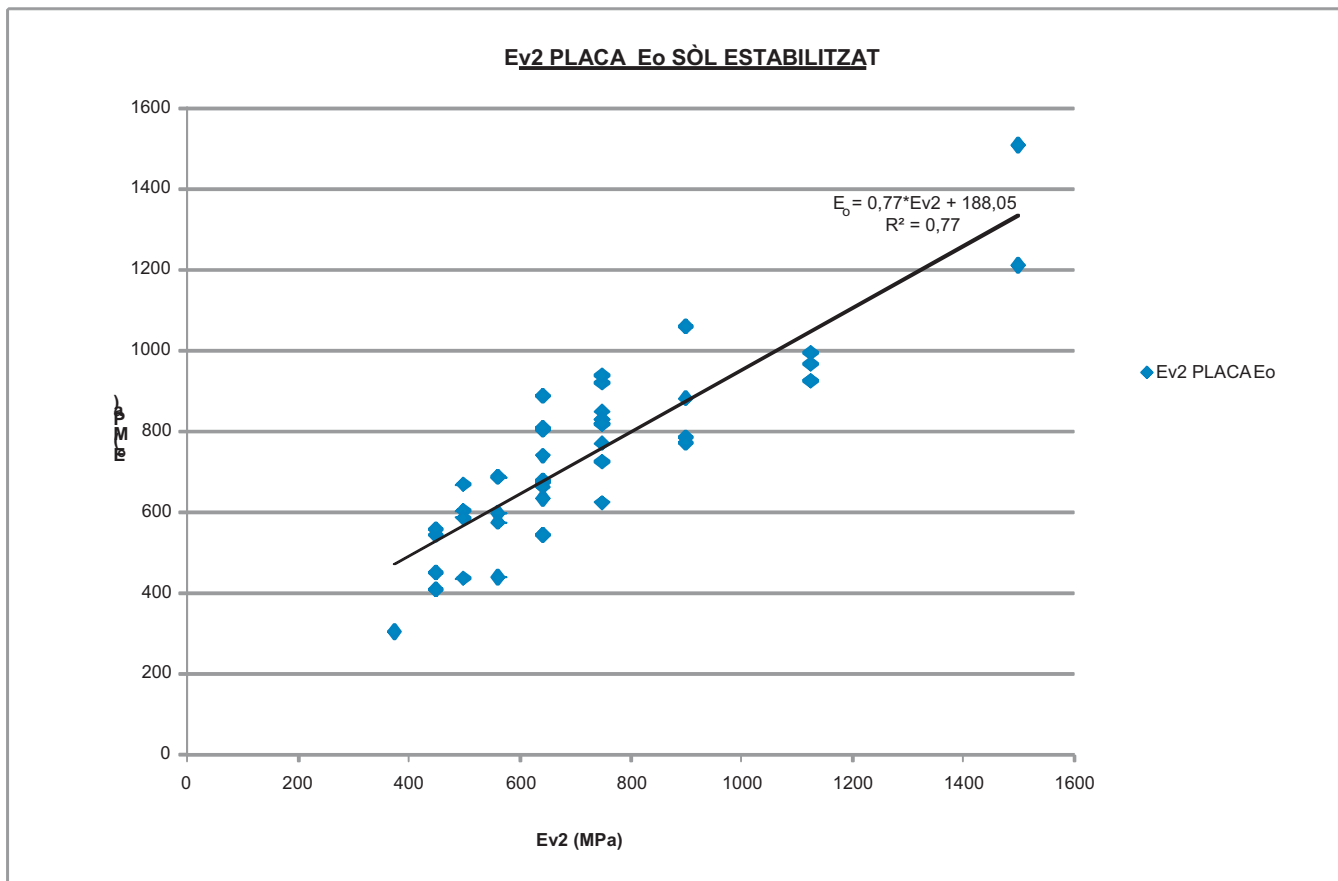
**Ev2 PLACA Eo SÒL SELECCIONAT**

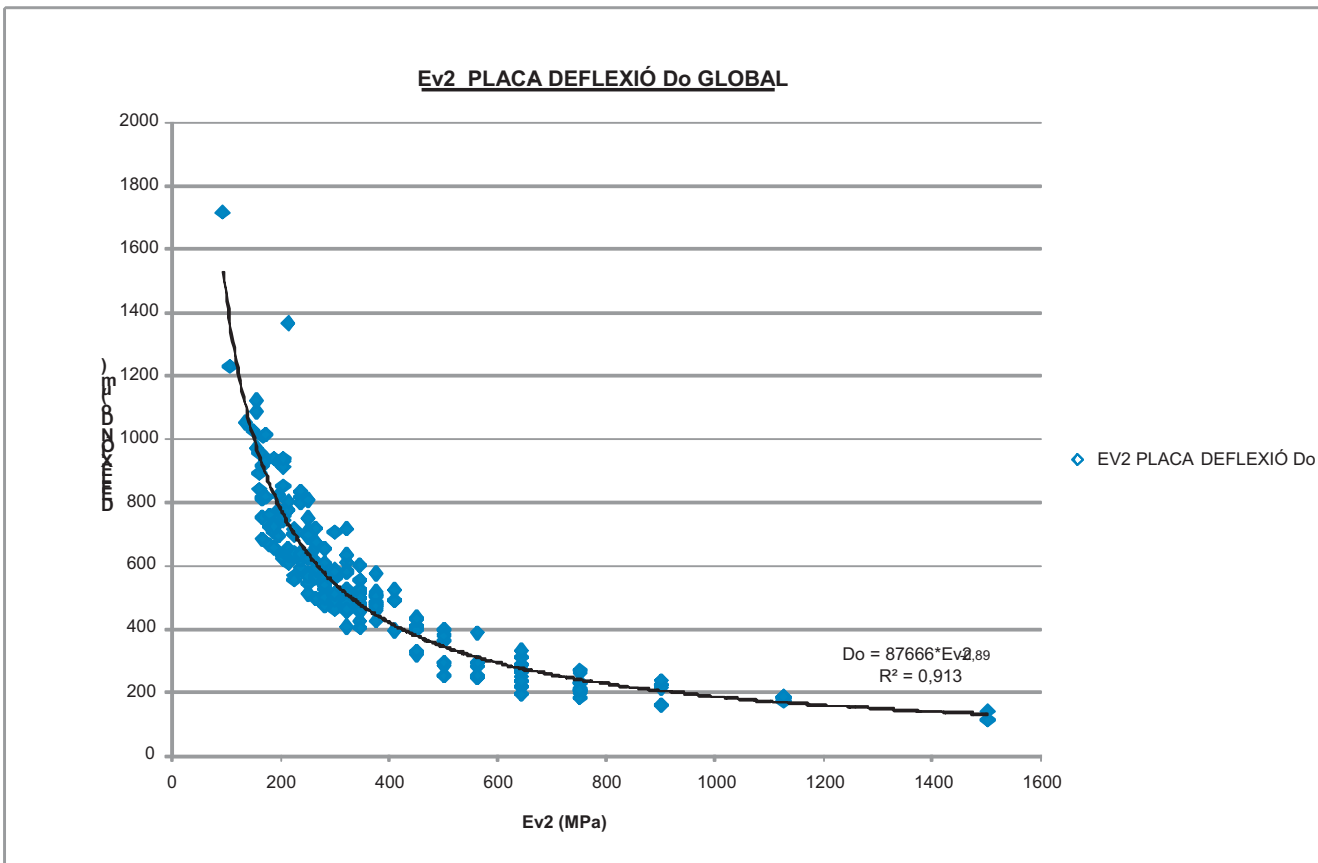
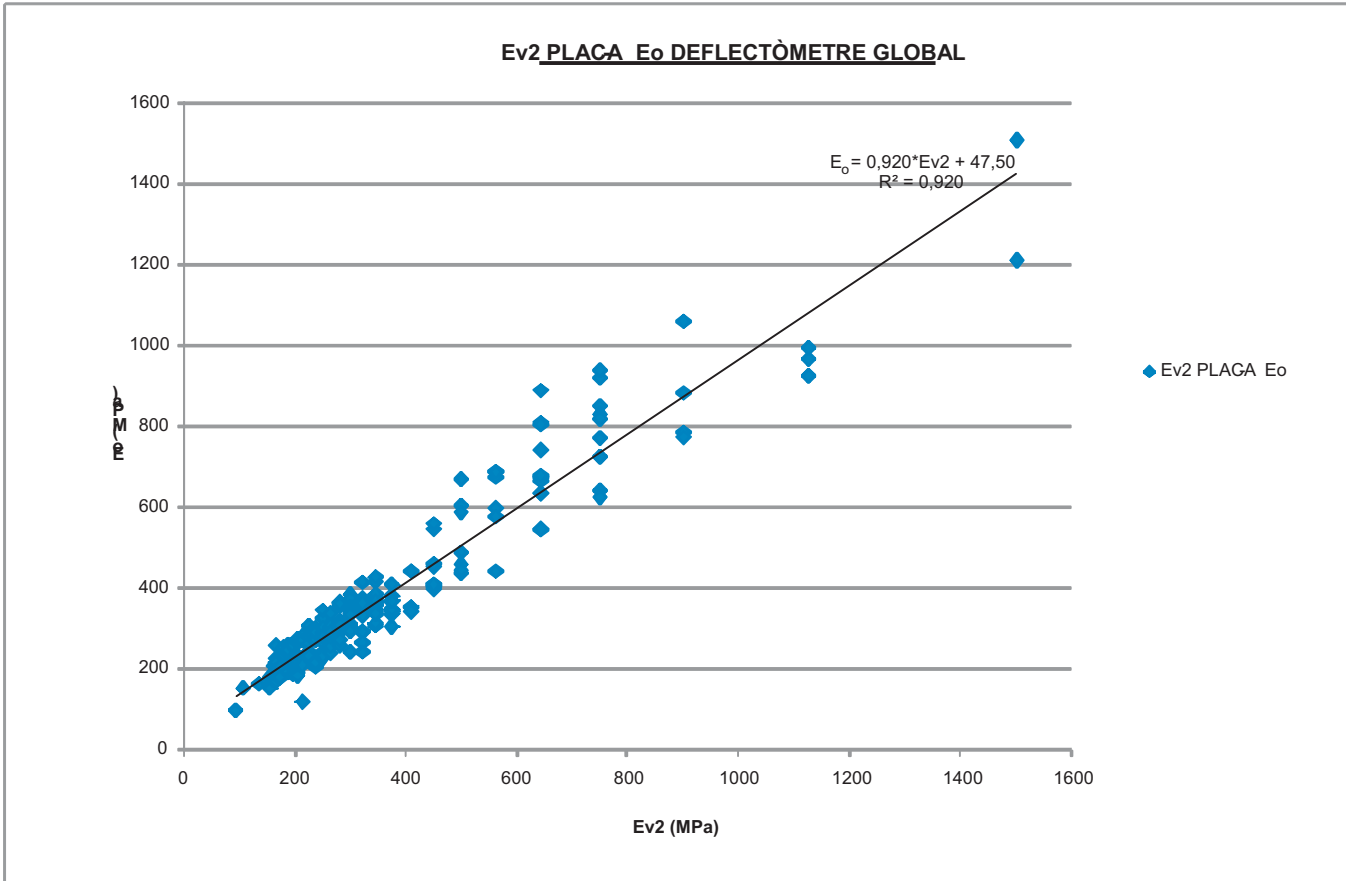


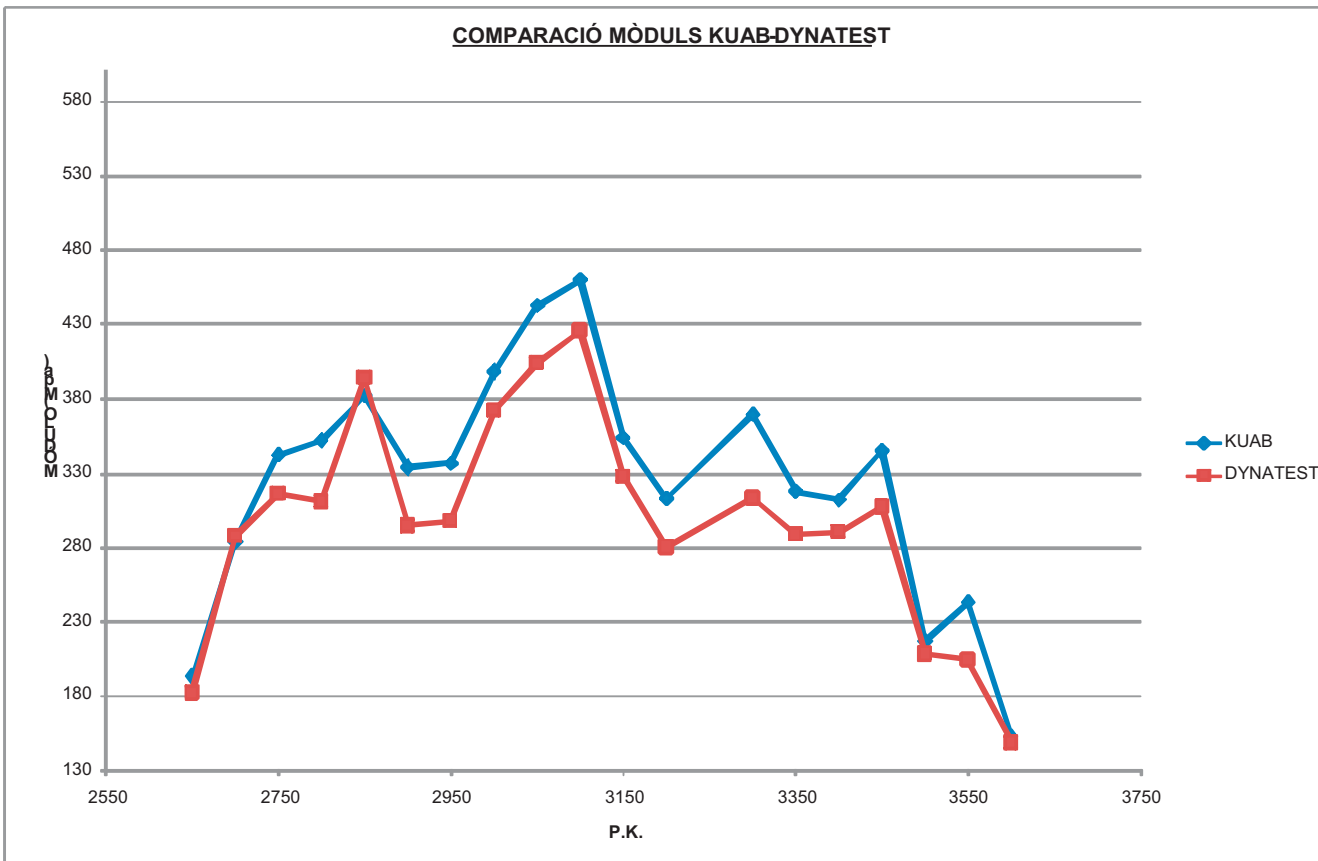
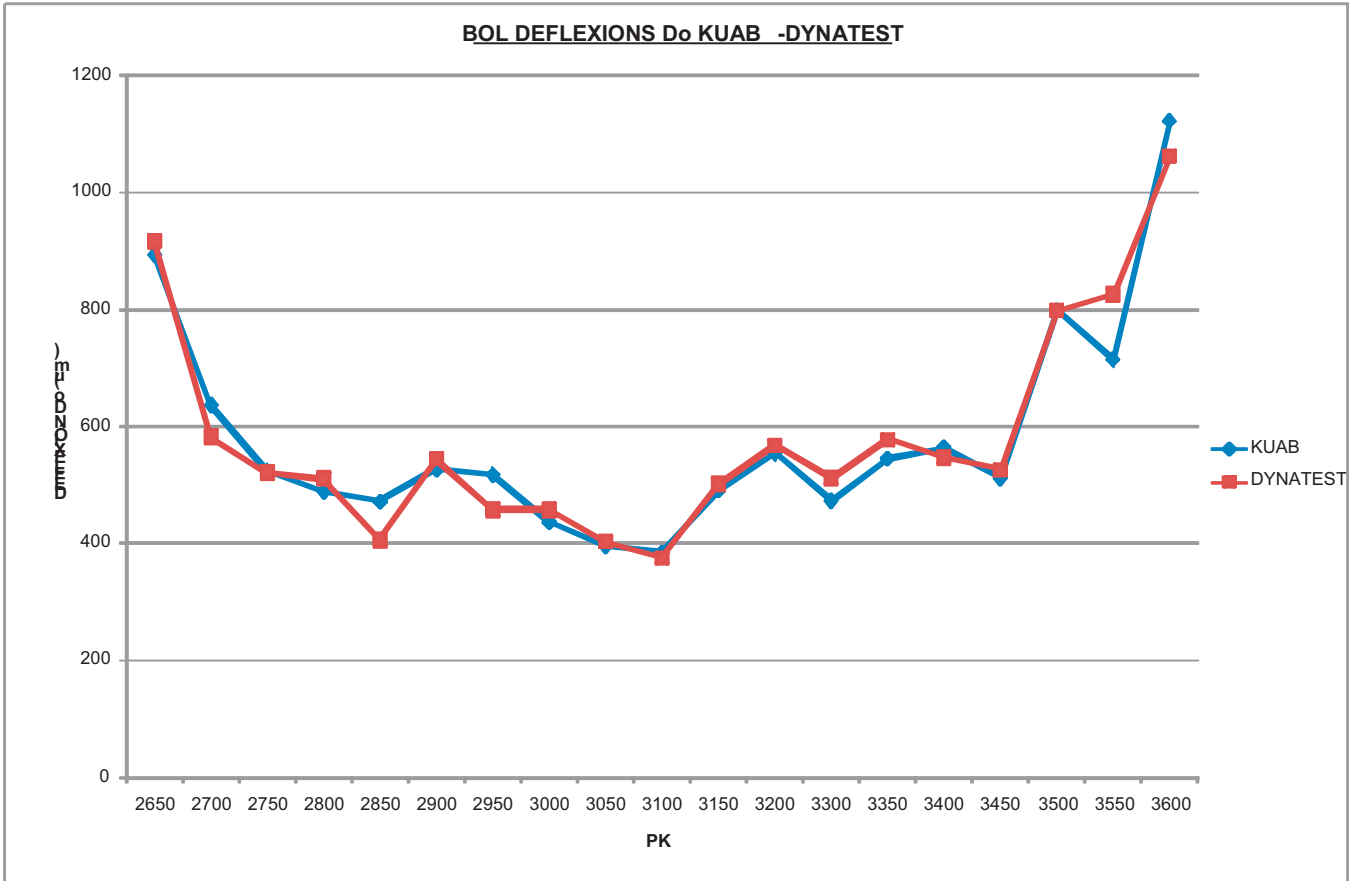
**Ev2 PLACA DE FLEXIÓ Do SÒL SELECCIONAT**











## **1 OBJETO, ÁMBITO DE APLICACIÓN Y CONTENIDOS.**

Esta norma recoge un procedimiento de diseño de firmes en el que se ha articulado el binomio solicitud real - respuesta estructural dando cabida tanto a consideraciones teóricas como a otras basadas en la experiencia acumulada en la Comunitat Valenciana. Se pretende, en última instancia, la optimización de los recursos destinados a la construcción de infraestructuras viarias.

Esta norma es de aplicación a los proyectos de firmes de carreteras de nueva construcción y de acondicionamiento de las existentes y, salvo justificación en contrario, también a los de reconstrucción total de firmes. Dichas carreteras son las que forman parte del sistema viario de la Comunitat Valenciana, exceptuando las vías de titularidad estatal.

La norma no es aplicable a los pavimentos sobre puentes ni en túneles. Tampoco es aplicable en los proyectos de rehabilitación superficial o estructural de los firmes y pavimentos de las carreteras en servicio, en los que ha de seguirse lo establecido en la Norma 6.3 IC "Rehabilitación de firmes".

Esta norma sólo es válida en los supuestos considerados en cada apartado. En otro caso deberán justificarse las soluciones adoptadas, manteniendo en lo posible los principios y las recomendaciones que se dan para garantizar una razonable equivalencia estructural de las secciones.

En general no se admite la construcción del firme por etapas, salvo en casos muy justificados y exclusivamente para las categorías de tráfico pesado T31 y T32, siempre y cuando la sección de firme inicialmente construida resulte estructuralmente suficiente hasta la ejecución de la segunda etapa y su superficie cumpla todos los requisitos exigidos a las capas de rodadura y a sus materiales constituyentes. En todo caso deberá recabarse autorización expresa a la Direcció General d'Obres Públiques de la Conselleria d'Infraestructures i Transport.

Junto a las especificaciones que se recogen en esta norma se establecerán las medidas necesarias para el cumplimiento de la legislación que en materia ambiental y de seguridad y salud estuviera vigente en cada momento.

En el capítulo 2 se presenta el sistema viario del territorio de la Comunitat Valenciana, cuya titularidad se reparten dos administraciones: la estatal y la autonómica. En concreto, la red viaria autonómica responde al contenido del artículo 49.14 del Estatuto de Autonomía, el cual establece que la Generalitat tiene competencia exclusiva en las carreteras y caminos cuyo itinerario transcurra íntegramente en el territorio de la Comunitat Valenciana. La aplicación de las disposiciones de la norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana se circunscribe al conjunto de las carreteras de titularidad autonómica, con independencia de que sean gestionadas por los ayuntamientos, por las diputaciones provinciales o por la propia Generalitat.

El capítulo 3, “Parámetros de dimensionamiento”, trata de las solicitaciones a las que se ve sometido el firme a lo largo de su vida útil, de la caracterización de su cimiento y de algunas singularidades que pudieran derivarse de su ubicación en zonas climáticas determinadas. Hay que destacar que se consideran las acciones derivadas del tráfico pesado de una manera más precisa que en la norma del Ministerio de Fomento, propugnándose la obtención de los espectros reales de cargas y expresando en todo caso el tráfico pesado en ejes equivalentes de 128 kN acumulados durante el período de proyecto. Sin embargo, en ausencia de estudios específicos se permite la valoración del tráfico pesado como en la Norma 6.1 IC; no obstante, se establecen, dependiendo de la calidad de la información obtenida en cada caso, aumentos o disminuciones del espesor de la capa estructural de la sección de firme proyectada respecto de la indicada en el catálogo incluido como referencia en el presente documento.

Mejorar las posibilidades de elección del tipo de explanada, con el rigor técnico necesario, constituye el objetivo primordial del apartado dedicado al cimiento del firme. Igual que hace la Norma 6.1 IC, se consideran como explanadas de máxima calidad las estabilizadas con cemento (aquí denominadas E4), pero se introduce una nueva categoría en la que se incluyen las formadas con suelos seleccionados de altas prestaciones (explanadas E3), las cuales, en la vigente normativa estatal, se engloban necesariamente en la categoría E2. También de manera análoga a como se presenta en dicha normativa estatal, para facilitar la labor del proyectista se presenta un cuadro de formación de explanadas según la naturaleza del terreno subyacente y con la posibilidad de empleo de distintos materiales (naturales o estabilizados).

Los capítulos 4 y 5 establecen las directrices que deben seguirse en el proceso de diseño de las secciones de firme, así como los criterios que se han tenido en cuenta en la propuesta recogida en el capítulo 6. Se definen los parámetros de caracterización de los distintos materiales, incluyendo sus correspondientes funciones de transferencia. Asimismo, se dan las necesarias pautas para la obtención, en los puntos más desfavorables en cada caso, de las tensiones y deformaciones producidas por las correspondientes acciones, indicándose la manera de valorarlas mediante las citadas funciones de transferencia.

Con el capítulo 6, “Secciones de Firme”, se quiere poner a disposición del proyectista un instrumento para que, una vez conocido el tráfico pesado y elegida la categoría de explanada, pueda tener una referencia inmediata de la sección más adecuada, según la disponibilidad y el coste de los materiales utilizables. A tal fin se presenta un catálogo de secciones de firme, de interpretación sencilla y de similar estructura que los que se incluyen en la Norma 6.1 IC.

Finaliza la norma con dos capítulos, “Arcenes” y “Aspectos constructivos”, que contienen diversas recomendaciones extraídas de la experiencia en la construcción de carreteras en la Comunitat Valenciana.

## **2 EL SISTEMA VIARIO DE LA COMUNITAT VALENCIANA.**

La ley 6/1991 de la Generalitat, de 27 de marzo, de Carreteras de la Comunidad Valenciana, define el sistema viario de la Comunitat Valenciana como el conjunto de todas las vías de tránsito rodado que trascurren por su territorio, independientemente de su titularidad y de sus características. En su título II “Elementos del sistema viario” se establece la clasificación funcional del sistema, indicando que está integrado por las siguientes redes:

- a) Red de carreteras del Estado, compuesta por las vías que tengan dicha calificación legal.
- b) Red básica de la Comunitat Valenciana, destinada a unir entre sí los núcleos básicos del sistema de asentamientos, conectar con la Red de carreteras del Estado y proporcionar acceso a las grandes infraestructuras del sistema de transportes.
- c) Red local de la Comunitat Valenciana, en la que se integran las carreteras recogidas en el catálogo del sistema viario y no incluidas en la Red básica de la Comunidad.
- d) Red de caminos de dominio público de la Comunitat Valenciana, compuesta por todas las vías de titularidad pública susceptibles de tránsito rodado, pero no incluidas en los apartados anteriores.

Las competencias que en materia de carreteras corresponden a la Generalitat encuentran su marco legal en la Constitución Española de 1978 y en el Estatuto de Autonomía de la Comunitat Valenciana. Son estas disposiciones en las que se ampara el Real Decreto 1627/1984, de 1 de agosto, sobre traspasos de funciones y servicios de la Administración del Estado a la Comunidad Valenciana en materia de carreteras (BOE nº 221, de 14 de septiembre de 1984).

La Constitución Española de 1978 establece que las comunidades autónomas podrán asumir competencias en materia de obras públicas de interés para ellas en su propio territorio (artículo 148.1.4); en materia de carreteras, sobre aquellas cuyo itinerario se desarrolle íntegramente en su territorio y, en los mismos términos, en materia de transporte por carretera (artículo 148.1.5). El Estatuto de Autonomía de la Comunitat Valenciana, aprobado por Ley Orgánica 5/1982, de 1 de julio, y modificado por Ley Orgánica 1/2006, de 10 de Abril, establece que la Generalitat tiene competencia exclusiva sobre las obras públicas que no tengan calificación legal de interés general del Estado o cuya realización no afecte a otra comunidad autónoma (artículo 49.13), y sobre las carreteras y caminos cuyo itinerario transcurra íntegramente en el territorio de la Comunitat Valenciana (artículo 49.14).

Sobre las bases de estas previsiones constitucionales y estatutarias fueron transferidas a la Generalitat determinadas funciones y servicios de la Administración del Estado en materia de carreteras por medio del Real Decreto 1627/1984, de 1 de agosto, y, en concreto, la administración y gestión de las carreteras que pasan a ser titularidad de la Comunidad



Autónoma, y las funciones que la Ley 51/1974 de Carreteras atribuye a los órganos de la Administración del Estado: la facultad de proyectar, construir, conservar y explotar nuevas carreteras. Según este Decreto de transferencias se consideran en la red hasta entonces administrada por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo dos categorías:

1. Carreteras estatales: todas las que se encuentran integradas en itinerarios de interés general del Estado, definiéndose como tales los siguientes:
  - Los itinerarios de tráfico internacional, incluidos en los correspondientes convenios.
  - Los itinerarios de acceso a los principales pasos fronterizos.
  - Los itinerarios de acceso a los puertos de interés general del Estado y a los aeropuertos de interés general servidos por líneas regulares de tráfico.
  - Los itinerarios de enlace entre las comunidades autónomas peninsulares, a través de los principales núcleos de población del territorio del Estado, formando una red continua.
2. Carreteras de titularidad autonómica: aquellas cuyo itinerario se desarrolla íntegramente en el territorio de la Comunitat Valenciana y no forman parte de los itinerarios de interés general del Estado.

La tabla 1 recoge la distribución por provincias y por titularidad de las carreteras de la Comunitat Valenciana.

**Tabla 1 . Longitud de las carreteras de la Comunitat Valenciana [km]**

	Estado	Generalitat	Diputaciones	Total
Castellón	407	1 022	698	2.127
Valencia	816	825	1.937	3.578
Alicante	650	1.064	1.005	2.719
<b>Total</b>	<b>1.873</b>	<b>2.911</b>	<b>3.640</b>	<b>8.424</b>

En términos de densidad de red (longitud de red / superficie), el mayor coeficiente corresponde a Alicante (0,4669), mientras que Valencia y Castellón tienen cifras prácticamente idénticas: 0,3308 y 0,3204), respectivamente (tabla 2). Los ratios longitud de red / número de habitantes se indican en la tabla 3.

**Tabla 2 - Densidad de las redes viarias de la Comunitat Valenciana [km/km<sup>2</sup>]**

	Estado	Generalitat	Diputaciones	Total
Castellón	0,0613	0,1539	0,1052	0,3204
Valencia	0,0755	0,0763	0,1791	0,3308
Alicante	0,1117	0,1827	0,1726	0,4669
<b>Total</b>	<b>0,0805</b>	<b>0,1250</b>	<b>0,1564</b>	<b>0,3619</b>

**Tabla 3 – Longitud de las redes viarias por número de habitantes en la Comunitat Valenciana [km/habitante]**

	Longitud de red	Nº habitantes	Ratio
Castellón	2.127	573.282	0,00371
Valencia	3.578	2.486.483	0,00144
Alicante	2.719	1.825.264	0,00149
<b>Total</b>	<b>8.424</b>	<b>4.885.029</b>	<b>0,00172</b>

Además de las redes de carreteras recogidas en las tablas 1, 2 y 3, ciertos caminos acondicionados y conservados por diversas administraciones (locales, agrarias, etc.) sirven de soporte a determinados tráficos interurbanos que en ocasiones llegan a ser apreciables.

La red estatal de la Comunitat Valenciana conecta ésta con las comunidades vecinas de Cataluña, Aragón, Castilla–La Mancha y Murcia. Además, existen tramos cuya finalidad consiste en proporcionar los principales accesos a los puertos de interés general del Estado: por ejemplo, la V-30, que comunica la A-7 con el puerto de Valencia. Las carreteras que conforman la red estatal en el territorio de la Comunitat Valenciana se recogen en la tabla 4.

La red autonómica tiene una longitud total de 6.551 km, estando gestionada por la Generalitat y por las tres Diputaciones provinciales. Jerárquicamente, se estructura en dos categorías:

- Red básica.
- Red local.

con 944 y 5.605 km, respectivamente.

Los principales ejes que configuran la red básica se detallan en la tabla 5A. Por otra parte, las carreteras de la red local que presentan mayores intensidades de tráfico se relacionan en la tabla 5B. En la tabla 6 se incluye un análisis de las carreteras de titularidad autonómica por rangos de intensidad media diaria de vehículos pesados (IMD<sub>P</sub>) en el carril de proyecto.

**Tabla 4 - Carreteras de la red del Estado en la Comunitat Valenciana**

A-23	A-3	N-IIIa
A-7	A-35	V-11
AP-7	N-220	V-21
CS-22	N-322	V-23
N-225	N-330	V-30
N-225a	N-332	V-31
N-232	N-337	A-31
N-234	N-344	A-70
N-238	N-420	A-77
N-340	N-III	N-325
		N-338

**Tabla 5A - Principales carreteras de la red básica autonómica**

Castellón	Valencia	Alicante
CV-10	CV-25	CV-70
CV-11	CV-30	CV-80
CV-12	CV-31	CV-81
CV-13	CV-32	CV-83
CV-14	CV-33	CV-84
CV-15	CV-35	CV-86
CV-16	CV-36	CV-91
CV-17	CV-37	CV-95
CV-18	CV-40	
CV-20	CV-41	
CV-21	CV-42	
CV-25	CV-43	
	CV-50	
	CV-60	
	CV-81	

**Tabla 5B - Principales carreteras de la red local autonómica**

Castellón	Valencia	Alicante
CV-142	CV-310	CV-737
CV-150	CV-315	CV-742
CV-226	CV-320	CV-743
CV-260	CV-336	CV-753
	CV-368	CV-909
	CV-370	
	CV-375	
	CV-405	
	CV-406	
	CV-520	
	CV-680	

**Tabla 6 – Longitud [%] de red autonómica por rangos de  $IMD_p$**

Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto				
	$IMD_p \geq 2.000$	$2.000 > IMD_p \geq 800$	$800 > IMD_p \geq 500$	$500 > IMD_p \geq 200$
%	6,17	17,30	9,50	18,60

Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto				
	$200 > IMD_p \geq 100$	$100 > IMD_p \geq 50$	$50 > IMD_p \geq 20$	$IMD_p < 20$
%	11,90	10,90	14,90	10,60

### 3 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO.

El dimensionamiento de un firme requiere el conocimiento, entre otros, de los siguientes parámetros:

- El tráfico pesado: intensidad, composición, distribución de cargas y su configuración.
- Las características del cimiento del firme, y en particular su capacidad de soporte.
- Las condiciones climáticas que puedan afectar al comportamiento del firme.
- Las características de los materiales empleados en las distintas capas del firme.

#### 3.1 Tráfico.

La sección de firme de una carretera de nueva construcción debe adecuarse, entre otros parámetros, al nivel de las solicitaciones de tráfico pesado previsto durante la vida útil establecida para aquélla. A los efectos del dimensionamiento práctico de la sección de firme, dicho nivel de solicitaciones se representa mediante la denominada “categoría de tráfico pesado” (apartado 3.1.4).

##### 3.1.1 Estudios de tráfico. Niveles de información.

Para la determinación de la categoría de tráfico pesado se empleará la información a la que se hace referencia a continuación, estableciéndose, en función de su cantidad, procedencia, fiabilidad y actualización, tres niveles de calidad de dicha información:

1-. **Nivel inferior**, si se dispone únicamente de:

- Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio ( $IMD_P$ ).

2-. **Nivel medio**, si se dispone de:

- Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio ( $IMD_P$ ).
- Coeficiente de agresividad medio del tráfico pesado ( $CAM$ ).

3-. **Nivel superior**, si se dispone al menos de:

- Espectro completo del tráfico pesado.
- Estudio de velocidades de circulación.
- Distribución temporal del tráfico pesado.

En cualquiera de los casos, es preceptiva la elaboración de un estudio de evolución del tráfico pesado, en el cual se contemplará el tráfico inducido y el generado en los meses

siguientes a la puesta en servicio, especialmente en el caso de obras de duplicación de calzada, así como el que pudiera derivarse de otras actuaciones incluidas en el Plan de Infraestructuras Estratégicas de la Comunitat Valenciana (*PIE*). En el caso de no disponer de datos concretos sobre la evolución del tráfico pesado o de su asignación a los distintos carriles de la calzada, se adoptarán las siguientes hipótesis:

- La tasa de crecimiento del tráfico pesado puede considerarse constante e igual al valor medio de las obtenidas en los últimos cinco años en la estación de aforo permanente o de control (primaria o secundaria) más próxima a la zona de estudio y localizada en el mismo itinerario. Esta misma tasa de crecimiento se empleará para determinar la  $IMD_P$  en el año de puesta en servicio.
- Puede considerarse que el año de puesta en servicio es el tercero a partir de la fecha de redacción del proyecto.
- En caso de construcción de vías de dos calzadas mediante la duplicación de una carretera convencional, se considerará en el año de la puesta en servicio un incremento adicional del tráfico pesado del 7%.
- En calzadas de dos carriles y con doble sentido de circulación, incide sobre cada carril la mitad de los vehículos pesados que circulan por la calzada.
- En calzadas de dos carriles por sentido de circulación, incide sobre el carril exterior la totalidad de los vehículos pesados que circulan por la calzada.
- En calzadas de tres o más carriles por sentido de circulación, incide sobre el carril exterior el 85 % de los vehículos pesados que circulan por la calzada.

### 3.1.2 Tráfico equivalente de proyecto.

El dimensionamiento de la estructura del firme requiere adoptar una carga tipo de cálculo; a efectos de aplicación de esta norma, se considera como referencia un eje simple con ruedas gemelas y carga total de 128 kN, con la configuración precisa definida en el apartado 5.2.

El tráfico equivalente de proyecto ( $TEP_{128kN}$ ) es un concepto aplicable a los niveles de información medio y superior que se define como el número acumulado de ejes equivalentes de 128 kN ( $EE_{128kN}$ ) previsto para el carril de proyecto durante el período de diseño del firme. Para el nivel de información medio, cuando no se dispongan de otros datos acerca de la evolución del tráfico pesado, el tráfico equivalente de proyecto se obtendrá a partir de la expresión:

$$TEP_{128kN} = IMD_P \cdot 365 \cdot CAM \cdot \frac{(1+r)^{VD} - 1}{r}$$

en la cual  $r$  es la tasa de crecimiento del tráfico pesado (en tanto por uno),  $VD$  es el período de diseño de la sección de firme, y  $CAM$  es el coeficiente de agresividad medio del tráfico pesado, definido de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.1.3.

El período de diseño será en general diferente para firmes flexibles y semirrígidos que para firmes rígidos. Salvo justificación en contrario por parte del proyectista, el período de diseño será:

- Firmes flexibles y semirrígidos: 20 años.
- Firmes rígidos: 30 años.

En el caso del nivel de información superior, para cada una de las categorías de vehículo pesado  $i$  ( $TEP_{128kNi}$ ), se calculará el número de ejes equivalentes de 128 kN acumulados durante el período de proyecto mediante la siguiente expresión:

$$TEP_{128kN_i} = IMD_{P_i} \cdot 365 \cdot CAM_i \cdot \frac{(1+r)^{VD} - 1}{r}$$

donde  $IMD_{P_i}$  representa la intensidad media diaria de vehículos pesados de cada categoría considerada  $i$ , en el carril de proyecto y en el año de puesta en servicio, y  $CAM_i$  representa el coeficiente de agresividad medio correspondiente a dicha categoría  $i$ , calculado tal y como se indica en el apartado 3.1.3. El número total de ejes equivalentes de 128 kN acumulados durante el período de diseño de la sección, es decir, el tráfico equivalente de proyecto ( $TEP_{128kN}$ ), en base al cual se establecerá la categoría de tráfico pesado para el dimensionamiento del firme, de acuerdo con la tabla 9, se obtendrá como resultado de la siguiente expresión:

$$TEP_{128kN} = \sum TEP_{128kN_i}$$

### 3.1.3 Agresividad del tráfico pesado.

El efecto de un vehículo pesado sobre el firme depende fundamentalmente de la configuración de los ejes (simple, doble, triple), de la carga de cada eje y del tipo de firme.

A efectos del dimensionamiento de la sección de un firme, el coeficiente de agresividad de un vehículo pesado se define como el número de ejes equivalentes de 128 kN que ejercen el mismo daño sobre el firme que el producido por el conjunto de sus ejes. El valor promedio de los coeficientes de agresividad ( $CA$ ) de los vehículos pesados que circulan sobre una sección de firme se denomina coeficiente de agresividad medio ( $CAM$ ).

Cuando no se disponga de ninguna información relativa al coeficiente de agresividad medio ( $CAM$ ), podrán emplearse los valores genéricamente establecidos para la red de

carreteras de la Comunitat Valenciana, que figuran en la tabla 7, en función de la propia categoría de tráfico pesado y del tipo de firme.

**Tabla 7 - Coeficiente de agresividad medio del tráfico pesado (CAM)**

Categoría de tráfico pesado		T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
Firme	Flexible	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3
	Semirrígido y rígido	1,0	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,4

Para el nivel de información superior, a partir de los datos recogidos en campañas de aforo y de pesaje dinámico se establecerá el espectro del tráfico pesado previsto para la carretera en cuestión, es decir, se definirá la composición detallada del tráfico pesado, la disposición, tipo y magnitud de las masas de sus ejes, y la velocidad de paso por la estación, distinguiendo al menos entre las siguientes categorías de vehículos:

- Vehículos rígidos de dos ejes.
- Vehículos rígidos de tres ejes.
- Vehículos rígidos o articulados de cuatro ejes.
- Vehículos articulados de cinco ejes.
- Vehículos articulados o trenes de carretera de más de cinco ejes.

A partir de estos datos, para cada vehículo pesado considerado individualmente, se calculará su coeficiente de agresividad (CA) como la suma de los ejes equivalentes de 128 kN que ejercen el mismo daño sobre el firme que cada uno de los ejes reales correspondientes a esa configuración.

A estos efectos, se considera que un eje simple que soporta un peso total  $P_i$  [kN] ejerce sobre el firme un daño igual al que produciría un número de ejes equivalentes de 128 kN dado por la siguiente expresión:

$$EE_{128kN} = \left( \frac{P_i}{128} \right)^\alpha$$

Análogamente, se considera que un eje doble (tándem) que soporta un peso total  $P_j$  [kN] ejerce sobre el firme un daño igual al que produciría un número de ejes equivalentes de 128 kN dado por la expresión:

$$EE_{128kN} = 1,4 \cdot \left( \frac{P_j/2}{128} \right)^\alpha$$

Del mismo modo, un eje triple (trídem) que soporta un peso total  $P_k$  [kN] ejerce sobre el firme un daño igual al que produciría un número de ejes equivalentes de 128 kN dado por la expresión:

$$EE_{128kN} = 2,3 \cdot \left( \frac{P_k/3}{128} \right)^\alpha$$

En las relaciones anteriores,  $\alpha$  es un exponente que depende del tipo de firme:

- Firmes flexibles:  $\alpha = 4$
- Firmes semirrígidos y rígidos:  $\alpha = 8$

Para cada categoría de vehículo pesado  $i$ , se determinará su coeficiente de agresividad medio ( $CAM_i$ ), como el promedio de los coeficientes de agresividad ( $CA$ ) de los vehículos pesados correspondientes a dicha categoría.

### 3.1.4 Categorías de tráfico pesado.

A los efectos de aplicación de esta norma se definen nueve categorías de tráfico pesado, según la  $IMD_P$  que se prevea para el carril de proyecto en el año de puesta en servicio para el nivel inferior de información, o bien según el tráfico equivalente de proyecto ( $TEP_{128kN}$ ), para los niveles medio y superior de información.

Las tablas 8 y 9 presentan dichas categorías de tráfico para los niveles inferior, y medio y superior, respectivamente.

**Tabla 8 - Categorías de tráfico pesado. Nivel inferior de información**

Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1	T21	T22
$IMD_P$	$\geq 4.000$	$< 4.000$	$< 2.000$	$< 800$	$< 500$
		$\geq 2.000$	$\geq 800$	$\geq 500$	$\geq 200$

Categoría de tráfico pesado	T31	T32	T41	T42
$IMD_P$	$< 200$	$< 100$	$< 50$	$< 20$
	$\geq 100$	$\geq 50$	$\geq 20$	



**Tabla 9 - Categorías de tráfico pesado. Niveles medio y superior de información**

Categoría de tráfico pesado		T00	T0	T1	T21	T22
TEP <sub>128kN</sub> [10 <sup>6</sup> ]	Flexible	≥ 30,4	< 30,4 ≥ 15,2	< 15,2 ≥ 4,35	< 4,35 ≥ 2,72	< 2,72 ≥ 1,09
	Semirrígido	≥ 39,1	< 39,1 ≥ 19,6	< 19,6 ≥ 6,09	< 6,09 ≥ 3,80	< 3,80 ≥ 1,52
	Rígido	≥ 73,7	< 73,7 ≥ 36,8	< 36,8 ≥ 11,5	< 11,5 ≥ 7,16	< 7,16 ≥ 2,87

Categoría de tráfico pesado		T31	T32	T41	T42
TEP <sub>128kN</sub> [10 <sup>6</sup> ]	Flexible	< 1,09 ≥ 0,543	< 0,543 ≥ 0,217	< 0,217 ≥ 0,054	< 0,054
	Semirrígido	< 1,52 ≥ 0,761	< 0,761 ≥ 0,272	< 0,272 ≥ 0,109	< 0,109
	Rígido	< 2,87 ≥ 1,43	< 1,43 ≥ 0,512	< 0,512 ≥ 0,164	< 0,164

La tabla 9 se ha obtenido suponiendo una tasa media anual del crecimiento del tráfico igual al 4,0 %, un período de proyecto de 20 años para los firmes flexibles y semirrígidos y de 30 años para los rígidos, y los coeficientes de agresividad media del tráfico pesado indicados en la tabla 7.

### 3.2 El cimiento del firme.

Se denomina explanada a la superficie de apoyo del firme. Por tanto, la explanada es la parte superior del cimiento del firme. Este cimiento está constituido en general por los propios suelos o la roca de la traza, por un suelo de aportación o, al menos en su parte superior, por un suelo estabilizado in situ; ocasionalmente, el cimiento del firme puede ser el tablero de una estructura, aunque esta situación está excluida del objeto de esta norma.

Tradicionalmente se ha identificado el cimiento con la coronación del relleno o con la parte superior del fondo del desmonte, hasta una profundidad de 50 cm. En el estado actual de la técnica se debe considerar como parte del cimiento todo el espesor de materiales bajo la explanada cuyo comportamiento pueda influir en el del firme. Aunque ese espesor depende tanto de la naturaleza de los materiales como de la del firme, puede admitirse que llega hasta los 2 m.

En la formación de la explanada el objetivo debe ser conseguir una superficie:

- con geometría definida, de manera que el espesor de la capa inferior del firme pueda ser sensiblemente uniforme;
- poco sensible a los cambios de humedad;
- con unas pendientes que permitan desaguar por gravedad el caudal que pueda infiltrarse a través del firme.

### 3.2.1 Materiales naturales.

A los efectos de la formación de las explanadas, se consideran seis tipos de materiales naturales, según las características definidas en el artículo 330 del PG-3 del Ministerio de Fomento:

- M: Suelos marginales o inadecuados.
- 0: Suelos tolerables (con  $CBR \geq 3$ ).
- 1: Suelos adecuados (con  $CBR \geq 5$ , excepto cuando se dispongan en la capa superior de las empleadas en la formación de las explanadas, en cuyo caso deberán tener  $CBR \geq 6$ ).
- 2: Suelos seleccionados (con  $CBR \geq 10$ , excepto cuando se dispongan en la capa superior de las empleadas en la formación de las explanadas de categoría E2, en cuyo caso deberán tener  $CBR \geq 12$ ).
- 3: Suelos seleccionados (con  $CBR \geq 20$ , excepto cuando se dispongan en la capa superior de las empleadas en la formación de las explanadas de categoría E3, en cuyo caso deberán tener  $CBR \geq 30$ ).
- R: Roca.

### 3.2.2 Estabilización de suelos.

A los efectos de la formación de las explanadas, se consideran tres tipos de materiales estabilizados, según las características definidas en el artículo 512 del PG-3 del Ministerio de Fomento:

- S-EST1: Suelos estabilizados in situ con cal o con cemento (con  $CBR \geq 6$  a los 7 días, y un mínimo del 2,0 % de cal o de cemento).
- S-EST2: Suelos estabilizados in situ con cal o con cemento (con  $CBR \geq 12$  a los 7 días, y un mínimo del 3,0 % de cal o de cemento).
- S-EST3: Suelos estabilizados in situ con cemento (con una resistencia a compresión simple de al menos 1,5 MPa a los 7 días, y un mínimo del 3,0 % de cemento).

### 3.2.3 Categorías de explanada.

A efectos de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen cuatro categorías de explanada, denominadas respectivamente E1, E2, E3 y E4, las cuales podrán formarse de alguna de las maneras definidas en el apartado 3.2.4.

La categoría de la explanada se determinará a partir de los resultados de ensayos de auscultación de la deflexión mediante un deflectómetro de impacto configurado para ejercer una carga de 49 kN sobre una placa de 30 cm de diámetro, o equivalente en términos de presión de contacto sobre la superficie.

A partir de las deflexiones registradas por el deflectómetro, se calculará el módulo elástico de superficie del cimiento del firme, que representa su rigidez equivalente, aplicando la siguiente expresión:

$$E_0 = \frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot r \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

donde  $E_0$  es el módulo elástico de superficie del cimiento del firme,  $\nu$  es el coeficiente de *Poisson* considerado, que depende de la propia categoría de la explanada,  $\sigma_0$  es la presión aplicada sobre la superficie, y  $d_0$  la deflexión registrada bajo el punto de aplicación de la carga.

Las categorías de la explanada se definirán en base a los siguientes valores de referencia de los módulos elásticos de superficie:

- E1:  $E_{0,ck} \geq 100$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E2:  $E_{0,ck} \geq 140$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E3:  $E_{0,ck} \geq 255$  MPa;  $\nu = 0,35$
- E4:  $E_{0,ck} \geq 440$  MPa;  $\nu = 0,30$

Los rangos anteriores se refieren al valor característico del módulo elástico de superficie  $E_{0,ck}$  obtenido como la media ( $m$ ) menos una vez la desviación típica ( $s$ ) de los resultados de al menos siete ensayos en el caso de longitudes de explanada a evaluar inferiores a 500 m, de diez ensayos para longitudes entre 500 y 1.000 m, o del número de ensayos que se obtenga como resultado de dividir entre 100 la longitud a evaluar cuando ésta sea superior a 1.000 m, es decir, realizando un ensayo cada 100 m. Estas longitudes deben entenderse referidas a tramos de formación o capacidad de soporte homogénea de las explanadas, para cuya definición deben emplearse los métodos estadísticos oportunos a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.

Para poder establecer la categoría de la explanada por medio del deflectómetro de impacto, será preceptiva la ejecución de un impacto de asentamiento, y posterior a éste se deberán efectuar al menos dos impactos de 49 kN en cada punto de ensayo, tomando como valor representativo la media de las deflexiones obtenidas en cada uno de ellos, siempre que sus valores no difieran en más de un 5%; en caso contrario, no podrá considerarse el ensayo como válido.

En caso de no disponerse de deflectómetro de impacto, se podrán emplear los módulos de compresibilidad obtenidos en el segundo ciclo de carga de ensayos de carga con placa definidos en la norma NLT-357, con los siguientes valores de referencia:

- E1:  $E_{v2} \geq 50$  MPa.
- E2:  $E_{v2} \geq 100$  MPa.
- E3:  $E_{v2} \geq 225$  MPa.
- E4:  $E_{v2} \geq 425$  MPa.

### 3.2.4 Formación de explanadas.

En la figura 1 se recogen las distintas posibilidades de formación de explanadas. En dicha figura, el espesor mínimo considerado de un suelo determinado en el terreno subyacente es de 1 m, al que hay que sumar los espesores de los materiales aportados o estabilizados que se indican explícitamente en cada caso.

Las explanadas E1 se podrán formar, cualquiera que sea la naturaleza del terreno subyacente, utilizando en la parte superior del cimiento suelos adecuados (o mejores) con CBR igual o mayor de 6 o suelos estabilizados in situ con cal o con cemento del tipo S-EST1.

Las explanadas E2 se podrán formar, cualquiera que sea la naturaleza del terreno subyacente, utilizando en la parte superior del cimiento suelos seleccionados con CBR igual o mayor de 12 o suelos estabilizados in situ con cal o con cemento del tipo S-EST2.

Las explanadas E3 se podrán formar, siempre que el terreno subyacente esté formado por suelos adecuados o materiales de mejor calidad, utilizando en la parte superior del cimiento suelos seleccionados con un CBR igual o mayor de 30.

Las explanadas E4 se podrán formar, siempre que el terreno subyacente esté formado por suelos adecuados o materiales de mejor calidad, utilizando en la parte superior del cimiento suelos estabilizados in situ con cemento del tipo S-EST3.

Si los terrenos subyacentes están constituidos por suelos inadecuados, marginales o tolerables, sólo se podrán formar sin restricciones explanadas de categoría E1 o E2.

En las categorías de explanada E3 y E4, la naturaleza de la capa de subbase vendrá condicionada por la naturaleza de la explanada: sobre explanadas constituidas por suelos naturales (E3) sólo se podrán disponer subbases de zahorra, y sobre explanadas estabilizadas (E4) sólo se podrán disponer subbases de suelocemento, excepto bajo pavimentos de hormigón para categorías de tráfico pesado T31 e inferiores.

En las categorías de explanada E2, la naturaleza de la capa de subbase vendrá determinada preferentemente por la naturaleza de la explanada. Sobre explanadas

constituidas por suelos naturales se dispondrán preferentemente subbases de zahorra, y sobre explanadas estabilizadas se dispondrán preferentemente subbases de suelocemento

En el caso de pedraplenes y rellenos todouno, los materiales del núcleo y de la transición de los pedraplenes, y de los rellenos todouno siempre que éstos satisfagan las exigencias del artículo 333 del PG-3, se asimilarán a un suelo seleccionado tipo 3 (salvo si se empleasen materiales marginales en su construcción). La coronación, con un espesor mínimo de 50 cm, se realizará en principio con un suelo seleccionado, obteniéndose así una explanada E2 o E3, según el CBR de dicho suelo seleccionado. Para conseguir una explanada E4, deberá estabilizarse su parte superior (S-EST3) en un espesor de 25 cm si se emplean suelos seleccionados del tipo 3, o en 30 cm si se emplean suelos seleccionados del tipo 2. Únicamente en este caso de estabilizar un espesor de 30 cm se podrán emplear en la coronación suelos adecuados. Alternativamente, se podrá formar también la explanada E4 disponiendo directamente sobre la transición un suelocemento fabricado en central con un espesor mínimo de 15 cm.

Salvo justificación en contrario, a los efectos de la definición de las secciones de firme empleando el catálogo incluido en el apartado 6.1, se unificarán las explanadas por su categoría, independientemente del tipo de obra de tierra subyacente y de las características y espesores de los materiales que la formen, de tal manera que no haya tramos diferenciados en el proyecto de longitud inferior a 500 m.



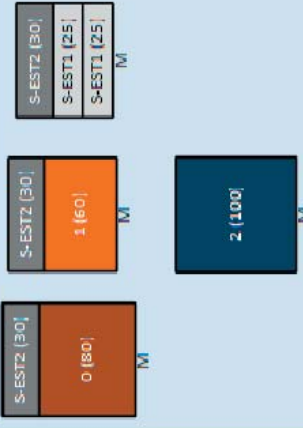


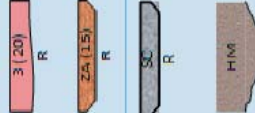


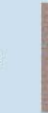
	Suelos marginales o inadecuados (M)	Suelos tolerables (0)	Suelos adecuados (1)	Suelos seleccionados (2) y (3)	Roca (R)
<b>E1</b>			<p>Espesor mínimo de 100 cm</p>		
<b>E2</b>			<p>Espesor mínimo de 100 cm (únicamente suelos seleccionados 2)</p>		
<b>E3</b>			<p>Espesor mínimo de 100 cm (únicamente suelos seleccionados 3)</p>		
<b>E4</b>					

Figura 1 – Tabla de formación de explanas. Espesor en (cm)

### 3.3 Clima.

Las condiciones climáticas de la zona en la que se ubica una carretera afectan al dimensionamiento del firme en diferentes aspectos, tal y como se indica en el apartado 5.3, por lo que deberán ser consideradas por el proyectista. Hay que tener en cuenta que aunque la Comunitat Valenciana cuenta en general con un clima benigno, se dan marcados signos de continentalidad en las zonas del interior así como notables episodios de lluvias torrenciales en los meses de primavera y otoño.

A los efectos del dimensionamiento del firme se han establecido en la Comunitat Valenciana cuatro zonas térmicas, en función de las temperaturas ambientales máxima y mínima anuales, y dos zonas pluviométricas, en función de la precipitación media anual.

**Tabla 10 - Zonas térmicas**

Zona térmica	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
$T_{MÁX}$	$\leq 28$	$> 28$ y $\leq 32$	$> 28$ y $\leq 32$	$> 32$
$T_{mín}$	$< -6$	$< -6$	$\geq -6$	-

**Tabla 11 - Zonas pluviométricas**

Zona pluviométrica	ZP1	ZP2
$P$	$< 600$	$\geq 600$

Siendo:

- $T_{MÁX}$ : máxima anual de las medias mensuales de las temperaturas máximas diarias, en °C, para un período de medida continuado de 30 años.
- $T_{mín}$ : mínima anual de las medias mensuales de las temperaturas mínimas diarias, en °C, para un período de medida continuado de 30 años.
- $P$ : precipitación media anual, en mm, para un período de medida continuado de 30 años.

Para la determinación de las zonas térmica y pluviométrica a considerar se analizarán las series de datos disponibles en la estación meteorológica representativa más cercana. Cuando la longitud de la carretera a proyectar sea tal que haya más de una estación representativa, en ningún caso se podrá realizar un promedio de los datos de las mismas, siendo preceptiva la división de la carretera en tramos, cuyos límites, a efectos de definición de las zonas climáticas, estarán determinados por los límites de influencia de cada una de las estaciones.

En caso de no disponer de series de datos de las estaciones meteorológicas próximas representativas, o de que dicha serie de datos no abarque un período mínimo de 30 años, podrá establecerse la clasificación de la zona climática mediante los mapas genéricos que se han elaborado para la Comunitat Valenciana y que se incluyen en las figuras 2 y 3.

Cuando la serie de datos exista y abarque un período de al menos 30 años, pero no sea continuada, se deberán completar los datos mediante la utilización justificada de las herramientas estadísticas oportunas. En ningún caso se podrán completar series en las que la ausencia de datos abarque un período de 5 años continuos.



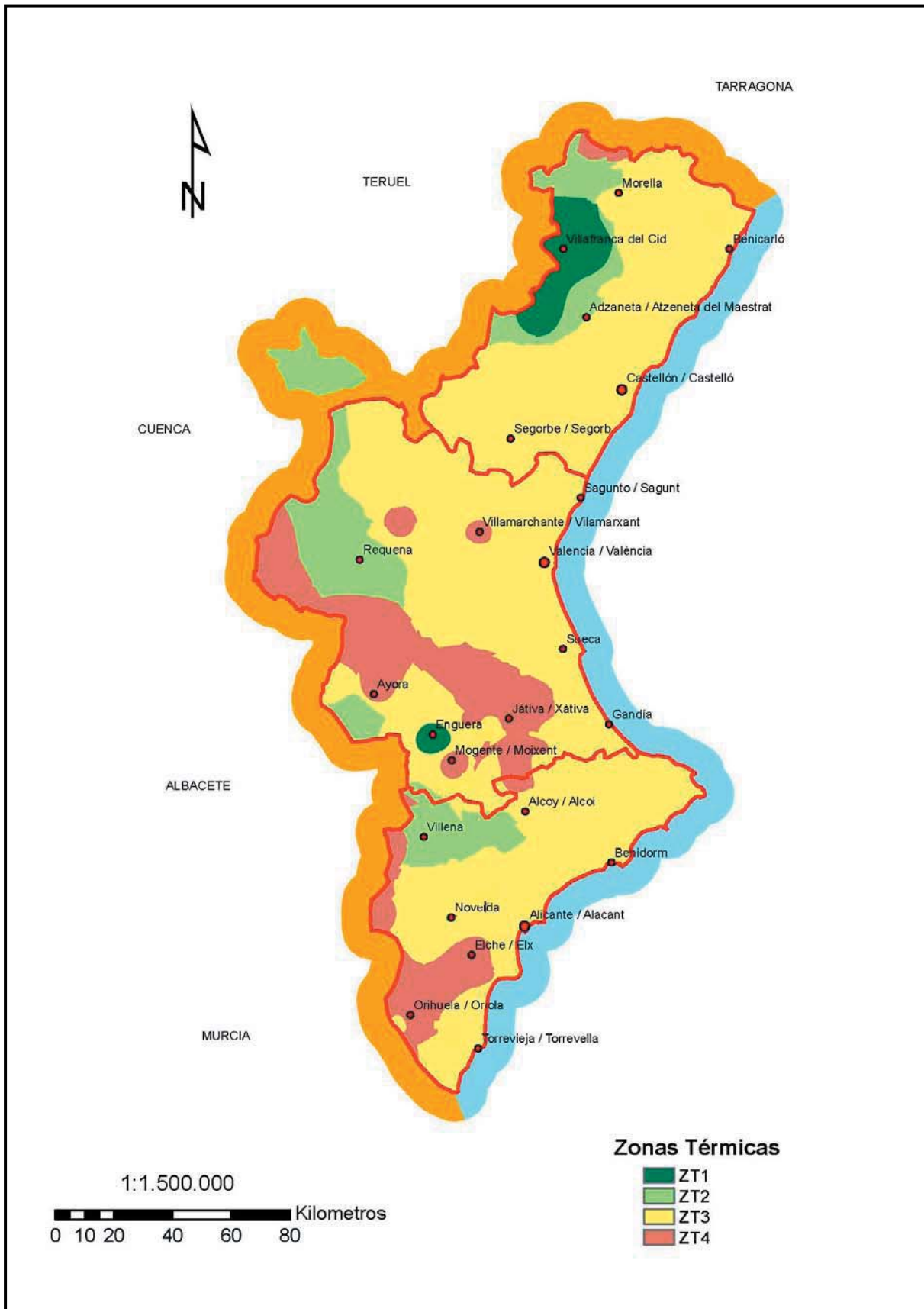


Figura 2 - Zonas térmicas de la Comunitat Valenciana

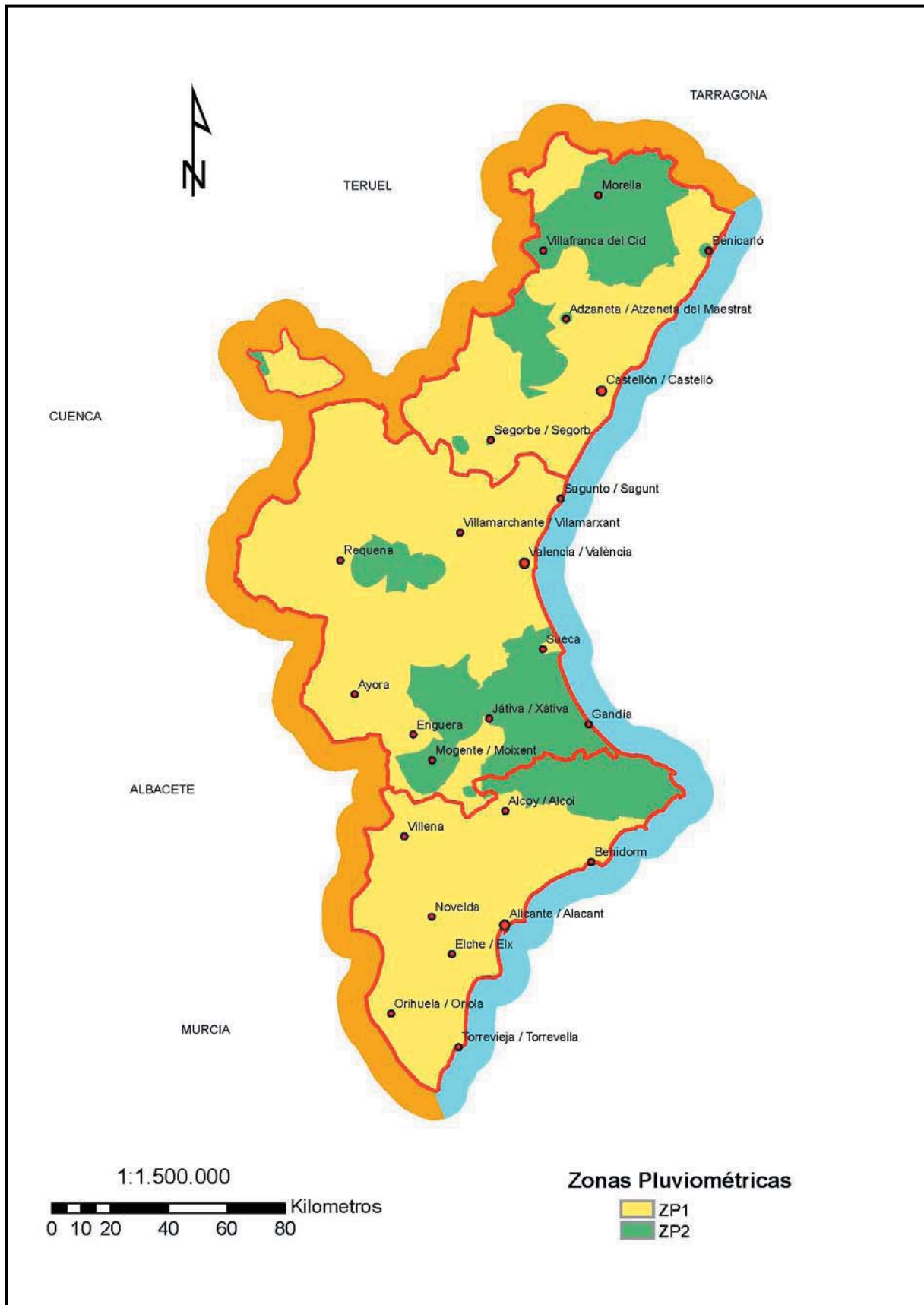


Figura 3 - Zonas pluviométricas de la Comunitat Valenciana

## **4 TÉCNICAS DE DIMENSIONAMIENTO.**

El dimensionamiento o diseño estructural del firme es una parte de los estudios técnicos que hay que acometer en la redacción de un proyecto de carreteras. El dimensionamiento va más allá de la simple elección del espesor de las capas que componen la sección estructural: las exigencias relativas a los materiales empleados, a los procesos de puesta en obra y al control de calidad de la unidad de obra terminada influyen decisivamente en que la capacidad estructural sea la prevista, por lo que deberán ser tenidas en cuenta durante todo el proceso.

El ingeniero deberá conocer con la mayor precisión posible todos los factores de diseño: vida útil, solicitaciones del tráfico pesado, capacidad de soporte del cimiento del firme, características mecánicas de los materiales que forman parte de las capas del firme y condiciones climáticas que pueden afectar a su comportamiento. Además, hay otros factores, no estrictamente técnicos, que el ingeniero habrá de valorar (situación geográfica, económica y ambiental de la carretera cuyo firme va a proyectar), ya que pueden condicionar algunas decisiones en el proceso de dimensionamiento.

El conjunto de cuestiones que es necesario analizar en el dimensionamiento del firme se considerarán globalmente, pues en cada una de las fases las decisiones que se adopten pueden afectar y condicionar a las tomadas en fases anteriores; por tanto, el dimensionamiento debe ser planteado como un proceso dinámico y permanentemente retroalimentado.

Esta norma prioriza el dimensionamiento del firme mediante métodos analíticos, cuya utilización debe ajustarse necesariamente al siguiente esquema:

1. Análisis de datos previos: estudios anteriores y experiencias en la zona de estudio.
2. Evaluación de condicionantes del proyecto: técnicos, económicos, geográficos y de cualquier otra índole que puedan afectar al dimensionamiento.
3. Prediseño: definición inicial de la sección de firme en base a las conclusiones de los análisis anteriores, teniendo en cuenta las especificaciones y recomendaciones sobre espesores máximos y mínimos de las distintas capas.
4. Definición de la capa de rodadura según los criterios funcionales que sea necesario satisfacer.
5. Modelización mecánica de las capas del firme y de su cimiento, de acuerdo con lo establecido en el apartado correspondiente de esta norma.
6. Cálculo de la respuesta estructural del firme, empleando una aplicación informática que tenga las características requeridas.

7. Comprobación de la vida útil del firme para los tipos de deterioro considerados, empleando para ello las leyes de fatiga o de deformación apropiadas (o las que correspondan, en caso de considerar otros deterioros).
8. Análisis de sensibilidad de los factores que el proyectista considere que su dispersión en la puesta en obra pueda suponer una merma en la capacidad estructural o funcional del firme: módulos elásticos, espesores de capa, resistencias a flexotracción de los materiales tratados, condiciones de adherencia entre las capas, capacidad de soporte del cimiento del firme, etc.
9. Ajuste de espesores, de acuerdo con criterios constructivos o técnicos.
10. Definición de la sección transversal del firme (realizando, si fuese necesario, un diseño específico para los arcones), junto con su sistema de drenaje si se requiere.

En los procesos de dimensionamiento o diseño estructural de los firmes, tanto si se emplean métodos empíricos como si se utilizan métodos analíticos, se deben distinguir dos tipos de estudios, según su nivel de detalle:

- **Estudios preliminares.** Su objetivo fundamental es estimar el coste total del proyecto. En este caso, los estudios geotécnicos, de caracterización del cimiento, de materiales, de tráfico y, en definitiva, todos los necesarios para la definición detallada del firme, no estarán aún disponibles, por lo que la sección se dimensionará, generalmente, por analogía con otros casos similares.
- **Estudios detallados.** En ellos se deben definir todas y cada una de las características técnicas del firme: cimiento, materiales y espesores de las capas, exigencias particulares que se deben plantear, etc. Estos estudios serán organizados en las siguientes fases:
  - definición de tramos homogéneos,
  - estudio del cimiento del firme y de formación de la explanada,
  - diseño propiamente dicho de las posibles secciones estructurales del firme,
  - análisis de los factores que sean necesarios para la toma de decisiones: condiciones locales, análisis de costes de construcción y de conservación, etc.

Las cuestiones básicas que han de analizarse al llevar a cabo el proceso son las siguientes:

- Calidad de servicio que se pretende dar, con lo que ineludiblemente se debe abordar el plan de conservación del firme (deseablemente en el marco de un sistema de gestión).
- Estrategias de inversión que puedan estar impuestas, y que condicionarán la definición del período de proyecto (vida de servicio o vida útil).

- Tipos de materiales que puedan utilizarse en la sección del firme. Sin excluir que el proyectista pueda considerar otros, los tipos de materiales sobre los que se apoya el desarrollo de esta norma son los siguientes:
  - Mezclas bituminosas y otros materiales tratados con ligantes hidrocarbonados.
  - Hormigones, hormigones magros y otros materiales tratados con conglomerantes hidráulicos.
  - Materiales granulares no tratados.
  - Suelos.

En concreto, las secciones que se incluyen en el catálogo propuesto en esta norma (cuya intención es la de constituir una referencia para el dimensionamiento analítico) se basan en el empleo de las siguientes unidades de obra:

- Mezclas bituminosas.
- Hormigones.
- Hormigones magros.
- Materiales granulares tratados con cemento.
- Zahorras artificiales.

En cualquier caso, el proyectista podrá justificar el empleo de materiales diferentes (nuevos o tradicionales) si son avalados por los correspondientes estudios y análisis que garanticen un correcto comportamiento de las secciones de firme constituidas con ellos.

El proyectista valorará todas las cuestiones de ingeniería y constructivas involucradas antes de abordar el diseño del firme, relacionando éste con otras partes del proyecto y garantizando su compatibilidad con lo establecido en ellas:

- Geometría de la carretera. Las anchuras de los carriles y de los arcenes deben ser conocidos por el proyectista del firme y éste debe tener en cuenta las opciones o posibilidades futuras de ampliación de la calzada, lo que puede afectar especialmente al dimensionamiento del arcén. Por otro lado, valores elevados de la pendiente longitudinal son un importante aspecto a considerar, ya que velocidades bajas del tráfico pesado en las rampas producen tensiones y deformaciones elevadas en la estructura del firme, las cuales requieren consideraciones especiales sobre el comportamiento de los materiales.
- Movimientos de tierras. Se debe tener en cuenta la evaluación previa de la magnitud de los movimientos de tierras, valorando la distribución lineal de desmontes y terraplenes, así como su altura y la naturaleza prevista de los fondos de desmonte.
- Recogida y drenaje de las aguas que puedan llegar al firme, bien desde la superficie, bien desde capas freáticas.
- Consideraciones constructivas. Los plazos disponibles para la ejecución de las obras pueden alterar la estrategia para la selección del tipo de firme. Por otra parte, las

capacidades y la experiencia de los constructores locales y la disponibilidad de materiales de la zona deben ser tenidas en cuenta, en particular en proyectos pequeños.

- Capa de rodadura. Además de establecer la capacidad estructural del firme y su duración prevista, el proyectista debe definir en detalle la capa de rodadura, cuyas exigencias dependerán de la categoría de la carretera, de su geometría, del nivel de cargas que debe soportar, del clima de la zona, etc. Los tipos de capas de rodadura que se consideran en esta norma son los siguientes:
  - Mezclas bituminosas drenantes.
  - Mezclas bituminosas en capas de pequeño espesor.
  - Mezclas tipo hormigón asfáltico.
  - Riegos con gravilla.
  - Lechadas bituminosas.
  - Hormigones con distintas técnicas de acabado superficial.

En todo caso, las características superficiales mínimas a exigir serán las siguientes:

- La regularidad superficial (valorada mediante el IRI).
- La macrotextura (valorada por la MPD o mediante la altura de arena, MTD o ETD).
- La resistencia al deslizamiento (valorada mediante el CRT o mediante el CRL).

## 5 DIRECTRICES PARA EL DIMENSIONAMIENTO ANALÍTICO.

Esta norma pretende proporcionar al proyectista las herramientas necesarias para que éste pueda definir, en cada caso particular, la sección de firme que mejor se adapte a los condicionantes técnicos, económicos, de disponibilidad de materiales o de cualquier otra índole de la obra considerada. Por ello, se incluyen en este capítulo directrices para el dimensionamiento de las secciones mediante métodos analíticos.

### 5.1 Introducción.

Como en todo proceso de diseño estructural, para el dimensionamiento analítico de los firmes se requiere:

- Una teoría para predecir los estados de deterioro o fallo de la estructura.
- Una caracterización de las propiedades de los materiales acorde con la teoría seleccionada.
- Una forma de determinar las relaciones entre las magnitudes de los parámetros para conseguir el comportamiento deseado.

La teoría que se asume en esta norma es la de considerar los firmes como sistemas multicapa elásticos sometidos a las acciones del tráfico pesado. Para definir dichos sistemas se adoptan los siguientes supuestos básicos (hipótesis de Burmister):

- Las capas del firme y en su caso del cimiento son de amplitud indefinida en el plano horizontal.
- Las capas tienen un espesor uniforme.
- La última capa (la inferior de las consideradas en el cimiento) es infinita en sentido vertical (y se caracteriza como un espacio semiindefinido de *Boussinesq*).
- Las distintas capas están compuestas por materiales elásticos lineales, homogéneos e isotropos; estos materiales se definen mediante su *módulo de elasticidad* ( $E$ ) y su *coeficiente de Poisson* ( $\nu$ ).

Se aceptan además en la modelización las siguientes simplificaciones:

- Cada una de las cargas que actúa sobre el firme se representa mediante una presión distribuida uniformemente sobre un área circular en la superficie del pavimento.
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre las capas puede modelarse en condiciones de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales), parcial o nula.
- Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos (con las salvedades que se indican más adelante para los pavimentos de hormigón).
- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas, de modo que no alteran las hipótesis anteriores.

- No se consideran los esfuerzos cortantes que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento.
- No se considera la masa propia del firme.

En el caso de los firmes rígidos, la presencia de juntas (o de las fisuras cosidas mediante las armaduras en los pavimentos armados continuos) hace que en rigor la teoría multicapas no pueda ser aplicada en los mismos. No obstante, las tensiones máximas que se originan en ellos pueden ser evaluadas con suficiente aproximación aplicando a los resultados del análisis multicapas los coeficientes de mayoración que se indican más adelante.

Con estas hipótesis y simplificaciones, las ecuaciones en derivadas parciales que resultan del planteamiento del problema se resuelven mediante transformadas. La respuesta de la estructura se obtiene entonces en forma de integrales definidas que se resuelven numéricamente. Para ello, se utilizan aplicaciones informáticas de las que existen muchas versiones en el mercado (bastantes de ellas de acceso gratuito en Internet).

Para saber si el firme prediseñado está correctamente dimensionado, es decir, si el espesor de las capas es suficiente, se empieza determinando el estado tensional producido por una carga tipo. La carga tipo se fija a partir de las regulaciones sobre masas de los vehículos pesados y presiones de inflado de los neumáticos; en España, la regulación es la que se establece en el Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de Diciembre. A efectos de la aplicación de esta norma, se considera que la carga máxima por eje simple de referencia es de 13 t o 128 kN, y que la presión máxima de inflado permitida es de 900 kPa.

A partir de los valores de las *tensiones y de las deformaciones* obtenidas en el cálculo se determina el número  $N_f$  de veces que el firme es capaz de soportar la aplicación de la carga tipo mediante un análisis de fatiga o de deformaciones. Para ello se han debido establecer previamente las *funciones de transferencia* (leyes de fatiga o leyes de deformación) de los materiales que componen el firme. El valor de  $N_f$  debe ser superior al número  $N_t$  de aplicaciones de carga previstas durante el período de proyecto (es decir, el tráfico equivalente de proyecto), deducidas del estudio de tráfico correspondiente, de acuerdo con el apartado 3.1 de esta norma.

En el análisis de los firmes rígidos, los resultados del análisis multicapas deben mayorarse mediante un coeficiente que depende del tipo de pavimento de hormigón. Los valores de dichos coeficientes son los que se indican a continuación:

- Pavimentos de hormigón en masa con juntas sin pasadores: 1,75.
- Pavimentos de hormigón en masa con juntas con pasadores: 1,45.
- Pavimentos continuos de hormigón armado: 1,20.

Las citadas *funciones de transferencia* son expresiones matemáticas obtenidas a partir de ensayos de laboratorio y que deben ser calibradas en estudios a escala real, con las que se determina el número  $N_f$  de aplicaciones de la carga tipo que puede soportar el material estudiado antes de llegar al agotamiento estructural por fatiga, o al valor límite de



deformaciones plásticas acumuladas, a partir de ciertos **parámetros críticos** que forman parte de la respuesta del material a la sollicitación. En la práctica del diseño estructural de los firmes dichas funciones se obtienen de la literatura técnica, salvo que la normativa que se utilice prescriba el empleo de unas funciones determinadas.

En el dimensionamiento analítico de firmes se suele aceptar el concepto de daño acumulado de acuerdo a la hipótesis de *Miner*, según la cual si una capa con un módulo de elasticidad  $E_i$  y un coeficiente de *Poisson*  $\gamma_i$  es capaz de soportar  $N_{fij}$  aplicaciones de la carga tipo  $j$ , la fracción de daño producido por  $n_{ij}$  aplicaciones de dicha carga será:

$$d_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_{fij}}$$

de modo que el agotamiento estructural de la capa se producirá cuando se verifique la igualdad:

$$\sum_{i,j} d_{ij} = 1$$

## 5.2 Carga tipo y tráfico de proyecto.

El conocimiento del tráfico de vehículos pesados que solicitarán la sección estructural del firme es fundamental desde dos puntos de vista: por un lado, la categoría de tráfico pesado considerada supone un criterio para la definición de las exigencias de calidad que deben ofrecer los materiales empleados en la construcción del firme; por otro lado, el tráfico pesado representa un parámetro fundamental en el análisis del comportamiento a fatiga o frente a deformaciones de la sección del firme.

A los efectos de establecer las exigencias a los materiales que constituirán la sección será suficiente la definición de la categoría de tráfico pesado, de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.1 de esta norma, teniendo en cuenta el nivel de información de tráfico adoptado. Sin embargo, para llevar a cabo el cálculo de la sección de firme, el proyectista debe conocer el *Tráfico Equivalente de Proyecto*, el cual se expresará como el número de ejes equivalentes de 128 kN que debe soportar la sección de firme a lo largo de su vida de proyecto ( $TEP_{128kN}$ ), en función de lo establecido en el apartado 3.1 de esta norma y determinado de acuerdo con el nivel de información de tráfico adoptado.

Se considera que el eje equivalente es un eje simple, con ruedas gemelas y una carga total de 128 kN. Según lo expuesto más arriba, se asume que la carga por rueda se aplica sobre un área circular y también, con carácter general, que la presión de contacto es igual a la presión de inflado del neumático (algo que no es exacto, pero que ofrece una estimación suficientemente aproximada para utilizarla en el cálculo, que queda del lado de la seguridad).

La relación entre el radio de la superficie circular de contacto, la carga total por rueda y la presión de contacto es la siguiente:

$$P = q \cdot \pi \cdot R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{P}{q \cdot \pi}}$$

siendo:

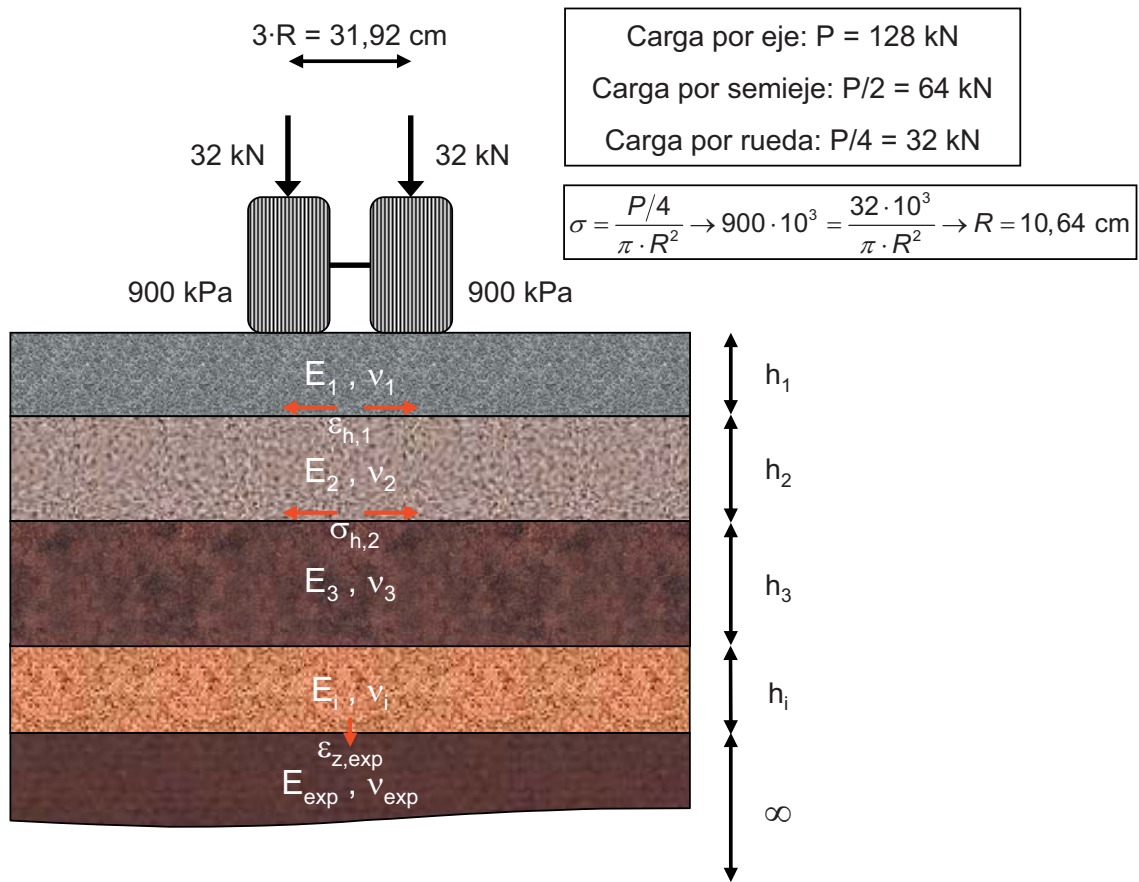
- $P$ : carga sobre la rueda [N].
- $q$ : presión de contacto (aproximadamente igual a la de inflado) [Pa].
- $R$ : radio de la superficie circular de contacto [m].

Para un eje equivalente de 128 kN, se tienen, por tanto, los siguientes valores en cada rueda:

- $P = \frac{128.000}{4} = 32.000 \text{ N}$
- $q = 900 \text{ kPa}$
- $R = 10,64 \text{ cm}$

A efectos de cálculo se emplea una carga de dos ruedas de 32.000 N cada una, con una separación entre sus respectivos centros igual a tres radios, es decir, 31,92 cm (de modo que existe una separación entre los bordes interiores de ambas ruedas igual a un radio, es decir, 10,64 cm). El punto medio de aplicación de las cargas está localizado a una distancia de 15,96 cm de cada uno de los centros de las ruedas, tal y como se indica en la figura 4.

El proyectista podrá, cuando las configuraciones de los vehículos pesados en su caso particular sean diferentes a éstas, y en base a estudios de tráfico debidamente justificados, emplear otros valores de carga por rueda, de presión de inflado y de distribución de carga. En ese caso, deberá justificar adecuadamente la adopción de un nuevo eje de referencia, los valores adoptados del *Coefficiente de Agresividad Media (CAM)* y la asignación de la categoría de tráfico pesado correspondiente.



**Figura 4 - Esquema de carga y sección tipo**

### 5.3 Datos climáticos.

De acuerdo con lo establecido en el apartado 3.3 de esta norma, se deberá tener en cuenta, a efectos del dimensionamiento de la sección de firme, en qué zonas térmica y pluviométrica se sitúa la obra que se está proyectando, tal y como se indica en el apartado 6.2.

El proyectista deberá tener en consideración que la zona térmica en la que se localice la obra afectará, fundamentalmente, a:

- El módulo elástico de cálculo de las mezclas bituminosas.
- La elección del tipo y características exigibles al ligante bituminoso empleado en las mezclas bituminosas.

- La distancia entre juntas en los pavimentos de hormigón en masa sin pasadores en las juntas, y entre fisuras inducidas en la prefisuración de capas de otros materiales con cemento.
- La adopción de medidas complementarias si las temperaturas previstas son muy elevadas o muy bajas.

Por otro lado, la zona pluviométrica en la que se localice la obra afectará, fundamentalmente, a:

- La elección del tipo y características exigibles a la capa de rodadura.
- La necesidad, o no, de sellado de las juntas transversales en los pavimentos de hormigón en masa.
- La adopción de medidas complementarias si son previsibles precipitaciones muy intensas o largos períodos de sequía extrema.

## 5.4 Caracterización de los materiales.

### 5.4.1 Niveles de calidad de la información.

Para el establecimiento de los parámetros característicos de los materiales a efectos del cálculo de las secciones de firme, se consideran tres posibles situaciones según la cantidad y calidad de las informaciones previas disponibles:

- **Nivel inferior:** si no se dispone de datos específicos sobre los materiales.
- **Nivel medio:** si se dispone sólo de los datos básicos sobre los materiales: tipo de mezclas bituminosas, resistencias exigidas a los materiales tratados con cemento, etc.
- **Nivel superior:** si se dispone de los datos necesarios para caracterizar por completo los materiales: composición y formulación de las mezclas bituminosas, tipo de ligante empleado, resistencias exigidas y previsibles de los hormigones y otros materiales con cemento, formación precisa de la explanada (y no tan sólo su categoría), etc.

### 5.4.2 Módulos elásticos y coeficientes de Poisson.

De acuerdo con las bases del diseño asumidas en esta norma, el comportamiento de los materiales empleados en una sección de firme se considera elástico y lineal y, por tanto, su caracterización a efectos de cálculo se llevará a cabo mediante su módulo de elasticidad

( $E$ ) y su coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ). Salvo que se disponga de estudios que aconsejen el empleo de otros valores diferentes, se utilizarán los valores que se incluyen en el apartado 6.2 de esta norma. En todo caso, los módulos elásticos utilizados en el dimensionamiento (módulos elásticos de cálculo) dependerán de la zona térmica considerada, así como del nivel de calidad de la información de los materiales:

- En caso de que el nivel de información de los materiales sea el inferior, se emplearán en cualquier caso los valores medios ( $E_{MED}$ ) indicados en el apartado 6.2.; en el caso de las mezclas bituminosas, estos valores medios deberán corregirse, tal y como se indica en dicho apartado, según la zona térmica en la que se localice la obra.
- En caso de emplear el nivel de información de los materiales medio, el proyectista podrá, justificadamente, adoptar el módulo de cálculo que considere más adecuado a las condiciones particulares de la obra y de los materiales; en este caso, los módulos elásticos empleados no podrán quedar fuera del intervalo  $E_{min} - E_{MAX}$  indicado en el apartado 6.2.
- En caso de emplear el nivel de información de los materiales superior, el proyectista podrá utilizar, justificadamente, el método de cálculo que considere oportuno para establecer el módulo elástico de las distintas capas, siempre que dicho método sea capaz de tener en cuenta, al menos, las variables siguientes:
  - Para las mezclas bituminosas: tipo de ligante empleado y sus características (punto de reblandecimiento, penetración a 25 °C, índice de penetración), temperatura de la mezcla, composición y formulación de la mezcla.
  - Para los hormigones y otros materiales con cemento: composición y formulación de la mezcla, resistencias previsibles.
  - Para los materiales no tratados: humedad del material, estado tensional.

#### 5.4.3 Funciones de transferencia.

Las funciones de transferencia son ecuaciones que relacionan la respuesta del firme a la aplicación de la carga tipo (en términos de tensiones y deformaciones) con el número de aplicaciones de dicha carga que la sección es capaz de resistir antes de llegar a una situación de fallo (agotamiento estructural, límite de deformación plástica acumulada, etc.). Salvo que se disponga de estudios que justifiquen el empleo de otras funciones de transferencia diferentes, se utilizarán las que se incluyen en el apartado 6.2 de esta norma.

En general, el modo de fallo de las mezclas bituminosas y de los materiales con cemento es la fisuración por esfuerzos de tracción repetidos e inferiores a su límite de rotura, por lo que la función de transferencia de dichos materiales es una *ley de fatiga*; por otro lado, el modo de fallo de los materiales no tratados es generalmente la acumulación de deformaciones verticales permanentes, por lo que su función de transferencia es una *ley de deformaciones*. No obstante, el proyectista podrá considerar, justificadamente, otros modos de fallo además de éstos.

No se consideran de aplicación las leyes de fatiga a las mezclas bituminosas dispuestas en capas de rodadura de pequeño espesor (mezclas tipo BBTM) o drenantes (mezclas tipo PA), puesto que no se encuentran sometidas, generalmente, a esfuerzos de tracción.

## **5.5 Espesores máximos y mínimos de capa.**

Una vez definido el tráfico equivalente de proyecto y fijados el resto de los parámetros de diseño, mediante el dimensionamiento analítico pueden calcularse distintas secciones estructuralmente suficientes. Para evitar una excesiva heterogeneidad en el inventario de firmes de las carreteras de nueva construcción dimensionadas con la presente norma, las capas constituyentes de la sección deberán cumplir, en cualquier caso, y sin perjuicio de lo establecido en el apartado 6.2 sobre espesores de tongada extendida, las siguientes disposiciones relativas a espesores de capa:

- El espesor total de mezclas bituminosas en caliente en una sección de firme no podrá ser inferior 5 cm ni superior a 35 cm. En caso de que las mezclas bituminosas se dispongan sobre una capa de gravacemento, el espesor total mínimo de aquéllas será de 15 cm en todos los casos.
- El espesor total de mezclas bituminosas de alto módulo no podrá ser inferior a 10 cm.
- El espesor total de suelocemento o de gravacemento no podrá ser inferior a 20 cm ni superior a 30 cm.
- El espesor total de zahorra artificial no podrá ser inferior a 20 cm (15 cm en el caso de arcenes) ni superior a 40 cm.

## **5.6 Condiciones de adherencia entre capas.**

Dado que la adherencia entre las diferentes capas que constituyen un firme es uno de los factores que más influye en su respuesta ante la aplicación de las cargas, deberá garantizarse, tomando las medidas que se consideren necesarias durante la fase de proyecto y en la obra, que se produce en todos los casos el mayor grado posible de adherencia entre todas las capas. A efectos de cálculo, se consideran tres situaciones posibles para cada interfaz:

- **Adherencia total:** No hay deslizamiento relativo entre ambas capas, de modo que los desplazamientos y deformaciones en la interfaz son iguales en ambas capas, apareciendo los correspondientes esfuerzos tangenciales.
- **Adherencia parcial:** Hay un deslizamiento relativo limitado entre ambas capas, de modo que los desplazamientos y deformaciones en la interfaz no son iguales en ambas capas, pero existen esfuerzos tangenciales.
- **Adherencia nula:** Hay un deslizamiento relativo total entre ambas capas, de modo que los desplazamientos y deformaciones en la interfaz no son iguales en ambas capas y no existen esfuerzos tangenciales.

En general, y salvo justificación en contra por parte del proyectista, se supondrá grado de adherencia total entre capas, excepto en los siguientes casos:

- Cuando sobre la capa de apoyo de un pavimento de hormigón se disponga una lámina de plástico, se considerará adherencia nula.
- Entre dos capas de materiales con cemento se considerará adherencia parcial.
- Si la relación entre módulos de dos capas contiguas es superior a 10 se considerará adherencia parcial.
- En la fase de construcción, cuando exista evidencia de que no se están garantizando las condiciones de adherencia total correspondiente, se considerará adherencia parcial o nula.

Siempre que se calcule la sección considerando adherencia parcial o total entre algunas de sus capas deberán diseñarse las medidas oportunas para garantizarla (riegos de adherencia, de imprimación, etc.), y deberán establecerse los controles correspondientes durante la puesta en obra.

Cuando la aplicación informática empleada para el dimensionamiento no permita la modelización de la adherencia parcial entre capas, se tomará para su utilización en la función de transferencia correspondiente la media de los resultados correspondientes (deformaciones o tensiones, según corresponda) a los casos de adherencia total y de adherencia nula.

## 5.7 Parámetros críticos.

Los parámetros críticos forman parte de la respuesta del firme ante la aplicación de la carga y son los que permiten, a través de las funciones de transferencia correspondientes, determinar el número máximo de aplicaciones de la carga tipo que cada material es capaz de soportar. Los valores críticos que han de considerarse son los siguientes:

- **Mezclas bituminosas:** máxima deformación horizontal de tracción en la fibra inferior de la capa ( $\varepsilon_h$ ).
- **Capas con cemento y suelos estabilizados S-EST3:** máxima tensión horizontal de tracción en la fibra inferior de la capa ( $\sigma_h$ ).
- **Capas granulares y explanadas de categoría E1, E2 y E3:** máxima deformación vertical de compresión en la fibra superior de la capa o de la explanada ( $\varepsilon_z$ ).

Se determinarán en cada caso los valores de cálculo de los parámetros críticos en los puntos **donde adquieran sus valores máximos**, es decir, se estudiará si las máximas sollicitaciones se producen entre las ruedas gemelas o en el centro de ellas.

## 5.8 Aplicaciones informáticas.

Para la obtención de la respuesta de la sección estructural del firme bajo la aplicación de la carga tipo se empleará una aplicación informática acorde con las hipótesis descritas en este capítulo y que permita llevar a cabo todos los análisis indicados en los apartados anteriores. Se recomienda, en principio, el empleo de programas de distribución libre y gratuita.

Es deseable, aunque no resulte imprescindible, que la aplicación elegida permita algunas de las siguientes posibilidades:

- La entrada de datos en unidades del sistema internacional o en múltiplos y submúltiplos de ellas.
- Diferentes grados de adherencia entre las capas.
- La aplicación de cargas múltiples.
- Un número no limitado de capas.
- La visualización gráfica de los resultados.



## **6 SECCIONES DE FIRME.**

### **6.1 Catálogo de secciones de firme.**

Además de proporcionar al proyectista las directrices necesarias para el dimensionamiento analítico de las secciones de firme, en esta norma se ha optado también por presentar posibles soluciones de referencia en un catálogo (figura 5), las cuales han sido dimensionadas con criterios analíticos y empíricos. Los espesores indicados en las secciones del catálogo se consideran mínimos en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto, y sólo serán de aplicación directa si los datos disponibles de tráfico son los correspondientes al nivel superior de información.

Puesto que las secciones propuestas como referencia sólo pueden considerarse equivalentes para unas categorías de tráfico pesado y de explanada determinadas sólo en primera aproximación, es obligación del proyectista seleccionar la que, como resultado de un análisis de adecuación técnica y económica, resulte más apropiada a las condiciones concretas del proyecto, primando a estos efectos las cuestiones relacionadas con la disponibilidad de materiales y con los costes previsibles de conservación.

Cada sección se designa por un código de tres o de cuatro dígitos:

- Los dos primeros en el caso de secciones denominadas con cuatro dígitos, o el primero en el caso de secciones denominadas con tres dígitos, indican la categoría de tráfico pesado (T00 a T42).
- El tercero en el caso de secciones denominadas con cuatro dígitos o el segundo en el caso de secciones denominadas con tres dígitos, indica la categoría de explanada (E1 a E4).
- El último hace referencia al tipo de firme, con el siguiente criterio:
  - 1 para firme flexible (mezclas bituminosas sobre zahorra artificial).
  - 2 para firme semirrígido (mezclas bituminosas sobre suelocemento).
  - 3 para firme semirrígido (mezclas bituminosas sobre gravacemento).
  - 4 para firme rígido (pavimento de hormigón).

En el caso de que el dimensionamiento de la sección se realice empleando los niveles de calidad de la información de tráfico inferior o medio, el espesor de la capa estructural indicado en el catálogo (figura 5) se deberá incrementar en 3 cm (tres centímetros) para las categorías de tráfico pesado T21 o superiores, y en 2 cm (dos centímetros) para el resto. A estos efectos se considerará como capa estructural el suelocemento, la gravacemento, o el pavimento de hormigón en las secciones tipo 2, 3, o 4 respectivamente. En las secciones tipo 1 se considera como capa estructural la inferior de mezcla bituminosa, si por encima de ella hay por lo menos otras dos; si no existiesen al menos tres capas de mezcla bituminosa, el espesor de la capa de zahorra artificial situada más arriba en el firme entre las que pudieren existir se incrementará en 5 cm (cinco centímetros).

		Categoría de tráfico pesado									
		T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42		
E1	Categoría de explanada			26MB+40ZA 19MB+28SC 23HF+15HM	23MB+40ZA 15MB+25SC 23HF+15HM	20MB+40ZA 14MB+25SC 21HF+20ZA	17MB+40ZA 13MB+25SC 21HF+20ZA	12MB+40ZA 12MB+25SC 20HF+20ZA	5MB+40ZA 18HF+20ZA		
			29MB+30ZA 21MB+25SC 15MB+20GC+20SC 25HF+15HM	24MB+30ZA 19MB+25SC 15MB+20GC+20SC 23HF+15HM	20MB+30ZA 16MB+22SC 23HF+15HM	17MB+30ZA 15MB+22SC 21HF+20ZA	14MB+30ZA 14MB+22SC 21HF+20ZA	11MB+30ZA 13MB+20SC 20HF+20ZA	5MB+30ZA 18HF+20ZA		
E3		31MB+30ZA 28HF+15HM	27MB+30ZA 27HF+15HM 23HFAC+15HM	17MB+30ZA 23HF+15HM	14MB+30ZA 23HF+15HM	11MB+30ZA 21HF+20ZA	5MB+40ZA 21HF+20ZA	5MB+25ZA 20HF+20ZA	5MB+20ZA 18HF+20ZA		
		15MB+28SC 18MB+24GC 28HF+15HM 24HFAC+15HM	14MB+25SC 18MB+22GC 27HF+15HM 23HFAC+15HM	12MB+25SC 16MB+20GC 23HF+15HM	11MB+20SC 23HF+15HM	10MB+20SC 21HF	21HF	20HF	18HF		

En las categorías de tráfico T42 podrá disponerse un riego bicapa con gravilla como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.

**Figura 5 - Catálogo de secciones de firme**

## 6.2 Materiales.

En este apartado se analizan los posibles materiales a utilizar en las secciones de firme incluidas en el catálogo de la norma (figura 5), para los cuales los correspondientes Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares deberán tener en cuenta las especificaciones complementarias que se expresan en este apartado y en los anejos correspondientes.

### 6.2.1 Mezclas bituminosas en caliente.

Puesto que las características mecánicas de los materiales tratados con ligantes bituminosos dependen de la temperatura y de la velocidad de aplicación de la carga, los cálculos que se realicen para el dimensionamiento de la sección deberán contemplar valores de temperatura representativos de las condiciones específicas del proyecto, de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.3 de esta norma. A estos efectos, los valores de los módulos elásticos indicados en la tabla 12 deberán multiplicarse por el coeficiente corrector  $\gamma_{ZT}$  indicado en la tabla 13, en función de la zona climática en la que se localice la obra considerada.

En lo referente al tiempo de aplicación de la carga, se considera, salvo mejor criterio del proyectista debidamente justificado, un valor de frecuencia de 10,0 Hz. En los casos en los que se prevea una velocidad de los vehículos pesados reducida, se podrá considerar una frecuencia de aplicación de la carga de 6,5 Hz. En función de la frecuencia de aplicación de la carga, se modificarán los valores de los módulos elásticos indicados en la tabla 12, multiplicándolos por el coeficiente corrector  $\gamma_{Hz}$  indicado en la tabla 13.

El valor del módulo elástico de las mezclas bituminosas que se debe emplear en el dimensionamiento de la sección (módulo elástico de cálculo  $E_{CÁLCULO}$ ) es, por tanto, el módulo medio ( $E_{MED}$ ) multiplicado por los coeficientes correctores  $\gamma_{ZT}$  y  $\gamma_{Hz}$ :

$$E_{CÁLCULO} = E_{MED} \cdot \gamma_{ZT} \cdot \gamma_{Hz}$$

Del mismo modo, los valores extremos que definen el rango admisible de los módulos elásticos para el nivel de información medio de los materiales ( $E_{mín}$  y  $E_{MÁX}$ ) que figuran en la tabla 12 deben multiplicarse en cada caso por el factor de corrección  $\gamma_{ZT}$  indicado en la tabla 13, para tener en cuenta la zona térmica en la que se localiza la obra.

Las leyes de fatiga de las mezclas bituminosas son del tipo:

$$\varepsilon_h = a \cdot N_f^{-b}$$

Donde  $\varepsilon_h$  es la deformación horizontal de tracción máxima en la capa y el valor de  $a$  depende del tipo de mezcla bituminosa. Salvo que se disponga de estudios que permitan o aconsejen el empleo de otros valores diferentes se utilizarán los que se incluyen en la tabla 12.

La utilización de una mezcla bituminosa en caliente de características genéricas en el dimensionamiento estará limitada exclusivamente al nivel inferior de calidad de información de los materiales, cuando no se puedan precisar los tipos de las mezclas bituminosas en caliente que compongan la sección. Asimismo, se podrá utilizar en la fase de prediseño de la sección, de acuerdo con lo indicado en el capítulo 4. En estos casos, esa mezcla bituminosa genérica se caracterizará por un valor de  $E_{MED}$  de 6.000 MPa, un coeficiente de Poisson de 0,35 y unos coeficientes  $a$  y  $b$  de  $6,691 \cdot 10^{-3}$  y 0,27243 respectivamente.

**Tabla 12 - Características mecánicas de las mezclas bituminosas**

Tipo	$E_{min}$ [MPa]	$E_{MAX}$ [MPa]	$E_{MED}$ [MPa]	$\nu$	$a$	$b$
BBTM 11 B M BBTM 8 B M	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
BBTM 11 A F BBTM 8 A F	4.000	5.250	5.000	0,35	-	-
PA 11	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
AC 16 surf D AC 22 surf D AC 22 bin D	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 16 surf S AC 22 surf S AC 22 bin S AC 32 bin S	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin G AC 32 bin G AC 22 base G AC 32 base G	2.500	7.000	5.000	0,33	$6,443 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin 15/25 AM AC 22 base 15/25 AM	10.000	14.000	11.000	0,30	$6,612 \cdot 10^{-3}$	0,27243

**Tabla 13 - Coeficientes correctores  $\gamma_{ZT}$  y  $\gamma_{Hz}$  para mezclas bituminosas**

Zona térmica	$\gamma_{ZT}$	Frecuencia [Hz]	$\gamma_{Hz}$
ZT1	1,25	10,0	1,00
ZT2	1,00	6,5	0,85
ZT3	0,80		
ZT4	0,75		

Cuando el nivel de calidad de información del tráfico sea el superior, y se opte por el dimensionamiento mensual, utilizando el concepto de daño de fatiga acumulado según la hipótesis de *Miner*, los valores de los módulos elásticos indicados en la tabla 12 deberán multiplicarse por el coeficiente corrector  $\gamma_{MENSUAL}$  indicado en la tabla 14, en función de la zona climática en la que se localice la obra considerada y del mes del año considerado, de forma que el módulo elástico de cálculo para cada mes  $i$  ( $E_{CÁLCULO}^i$ ) es, por tanto, el módulo medio ( $E_{MED}$ ) multiplicado por los coeficientes correctores  $\gamma_{MENSUAL}$  y  $\gamma_{Hz}$ :

$$E_{CÁLCULO}^i = E_{MED} \cdot \gamma_{MENSUAL}^i \cdot \gamma_{Hz}$$

**Tabla 14 - Coeficiente corrector  $\gamma_{MENSUAL}$  para mezclas bituminosas**

Zona térmica	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ZT1	1,75	1,70	1,50	1,40	1,10	0,85	0,60	0,65	0,85	1,15	1,50	1,65
ZT2	1,60	1,50	1,30	1,10	0,85	0,60	0,40	0,40	0,55	0,85	1,25	1,50
ZT3	1,25	1,20	1,05	0,90	0,70	0,50	0,40	0,35	0,45	0,70	0,95	1,20
ZT4	1,30	1,20	1,00	0,85	0,65	0,45	0,30	0,30	0,40	0,65	0,95	1,20

Los espesores de cada capa de mezcla bituminosa estarán dentro de los rangos establecidos en la tabla 15. En general, y con el objetivo de dotar a la sección de firme de la mayor continuidad posible, el número de capas debe ser el menor posible.

**Tabla 15 - Espesores de las capas de mezcla bituminosa**

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado		
		T00 a T21	T22 y T31	T32 a T42
Rodadura	PA 11 <sup>(1)</sup>	4		
	BBTM 11 B M	3		
	BBTM 8 B M		2	
	BBTM 11 A F	3		
	BBTM 8 A F		2	
	AC 16 surf D			
	AC 22 surf D		5 - 6	5
	AC 16 surf S			
Intermedia	AC 22 surf S			
	AC 22 bin D			
	AC 22 bin S			
	AC 32 bin S		5 - 10	
	AC 22 bin G <sup>(2)</sup>			
Base	AC 32 bin G <sup>(2)</sup>			
	AC 22 bin 15/25 AM	7 - 13		
	AC 32 base S			
	AC 22 base G		7 - 15	
	AC 32 base G			
	AC 22 base 15/25 AM	7 - 13		

(1) Se podrán proyectar pavimentos con mezcla drenante PA, siempre que se justifique detalladamente su idoneidad para el caso concreto del que se trate. La justificación deberá tener en cuenta, entre otros factores, la inclinación longitudinal de la vía, la pluviometría de la zona, la intensidad total del tráfico y la necesidad de reducir el ruido en las márgenes de la carretera. En cualquier caso, la longitud pavimentada con este tipo de mezcla no será inferior a 500 m.

(2) Las mezclas tipo AC 22 bin G y AC 32 bin G únicamente podrán emplearse cuando la capa de rodadura sea tipo AC (es decir, nunca bajo rodaduras tipo PA o BBTM) y con una dotación mínima de ligante del 4,0 % en masa sobre el total del árido seco incluido el polvo mineral.

Como capa de rodadura deberá emplearse la que satisfaga las condiciones funcionales exigidas, en función del tráfico y de la categoría y características geométricas de la carretera; salvo justificación en contra, deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para las categorías de tráfico pesado T00 a T21 se emplearán como capa de rodadura las mezclas bituminosas del tipo BBTM (preferentemente las correspondientes al huso granulométrico B).
- Con el fin de mejorar la seguridad y comodidad de la circulación en tiempo de lluvia, en carreteras ubicadas dentro de la zona pluviométrica ZP2 con intensidad de tráfico superior a 10.000 vehículos/día, independientemente del tráfico pesado, se emplearán como capa de rodadura las mezclas bituminosas del tipo BBTM (preferentemente las correspondientes al huso granulométrico B).

Con categorías de tráfico pesado T00 a T21 y categorías de explanada E3 o E4 podrán utilizarse, previa justificación técnica por parte del proyectista, mezclas bituminosas de alto módulo tanto en capas de base (AC 22 base 15/25 AM) como en capas intermedias (AC 22 bin 15/25 AM).

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear, que será seleccionado, en función de la capa a que se destine la mezcla bituminosa en caliente, de la zona térmica en que se encuentre y de la categoría de tráfico pesado, entre los que se indican en las tablas 16A y 16B.

**Tabla 16A - Tipo de ligante a emplear (capa de rodadura y siguiente)**

Zona térmica	Categoría de tráfico pesado				
	T00 a T21	T21	T22 a T32	T41 y T42	Arcenes
ZT1, ZT2, ZT3	35/50 50/70 PMB 25/55-65 PMB 45/80-65	50/70 PMB 45/80-60b	50/70 PMB 45/80-60b	50/70	50/70
ZT4	35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-65	35/50 50/70 PMB 25/55-65 PMB 45/80-60b PMB 45/80-65	35/50 50/70 PMB 45/80-60b	50/70	50/70

**Tabla 16B - Tipo de ligante a emplear (capa de base, bajo otras dos)**

Zona térmica	Categoría de tráfico pesado		
	T00 y T0	T1 y T21	T22 a T32
ZT1, ZT2, ZT3	50/70 PMB 25/55-65	50/70	50/70
ZT4	35/50 50/70 PMB 25/55-65	35/50 50/70	50/70

Para mezclas bituminosas en caliente AC 22 bin 15/25 AM o AC 22 base 15/25 AM, el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear será PMB 10/40-70 para la categoría de tráfico pesado T00 y 15/25 para las categorías de tráfico pesado T0, T1 y T21.

Para las categorías de tráfico pesado T00 y T0, en las mezclas bituminosas a emplear en capas de rodadura se utilizarán exclusivamente betunes asfálticos modificados con polímeros.

Para mezclas bituminosas PA 11, además de los betunes modificados indicados en la tabla 16A, se podrá emplear el tipo PMB 45/80-60a, para las categorías de tráfico pesado T00 a T1.

### 6.2.2 Materiales con cemento.

Las características mecánicas de los materiales con cemento evolucionan con el tiempo, por lo que en el dimensionamiento analítico del firme se deben tener en cuenta:

- Las características a medio y a largo plazo, de forma que sea posible valorar el comportamiento de la capa durante toda la vida útil del firme.
- Las características a corto plazo, de forma que sea posible la comprobación de la capacidad estructural de la capa para soportar los esfuerzos iniciales: tráfico de obra o tráfico durante el primer año tras la puesta en servicio.

La ley de fatiga de un material tratado con cemento depende de la tensión horizontal de tracción máxima en la capa  $\sigma_h$  y de la resistencia a flexotracción a largo plazo  $R_{F,LP}$  del material:

$$\frac{\sigma_h}{R_{F,LP}} = \gamma_T \cdot (1 - a \cdot \log N_f)$$

El coeficiente  $\gamma_T$  se emplea para ajustar el modelo teórico al comportamiento real y su valor es de 0,8 para categorías de tráfico pesado T21 o superiores, y de 1,0 para categorías de tráfico pesado T22 o inferiores.

Puesto que las funciones de transferencia de este tipo de materiales presentan pendientes reducidas, una pequeña variación en la relación entre la tensión de cálculo y la resistencia a flexotracción del material da como resultado una gran modificación en el número de aplicaciones de carga admisibles; por este motivo, los valores de la resistencia a flexotracción de los materiales tratados con cemento considerados en el cálculo no podrán ser superiores a los que figuran en la tabla 17.

Para firmes de carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T22 el hormigón del pavimento tendrá una resistencia característica mínima a flexotracción de 4,5 MPa a 28 días (HF-4,5). Para las categorías T1, T21 y T22 dicha resistencia podrá disminuirse a 4,0 MPa (HF-4,0) incrementando en 2 cm los espesores indicados en el catálogo de secciones de firme (figura 5).

Para firmes de carreteras con categorías de tráfico pesado T31, T32, T41 y T42 o eventualmente en arcenes, el hormigón del pavimento tendrá una resistencia característica mínima a flexotracción de 4,0 MPa a 28 días (HF-4,0), aunque también podrá disminuirse dicha resistencia a 3,5 MPa (HF-3,5) incrementando en 2 cm los espesores indicados en el catálogo de secciones de firme (figura 5).

La cuantía geométrica del pavimento continuo de hormigón armado será del 0,7% para HF-4,5 y del 0,6% para HF-4,0. En este tipo de pavimentos se dispondrán anclajes al terreno en las secciones extremas, así como en las secciones especiales que lo requieran.

En el caso de los materiales granulares tratados con cemento, habitualmente no es sencillo conocer su resistencia a flexotracción; no obstante se puede estimar a partir de correlaciones con la resistencia a tracción indirecta o con la resistencia a compresión. Si no se dispusiese de correlaciones más precisas para el material empleado en cada caso particular, pueden utilizarse las siguientes relaciones teóricas aproximadas:

- $R_{C,LP} = 2 \cdot R_{C,7}$
- $R_{Ti,LP} = 0,12 \cdot R_{C,LP}$
- $R_{F,LP} = 1,50 \cdot R_{Ti,LP}$

donde  $R_{C,7}$  y  $R_{C,LP}$  son las resistencias a compresión simple a 7 días y a largo plazo, respectivamente, y  $R_{Ti,LP}$  es la resistencia a tracción indirecta y  $R_{F,LP}$  la resistencia a flexotracción a largo plazo.

A efectos de aplicación de las funciones de transferencia, cuando no se conozcan exactamente las características de las capas que forman el cimiento, las explanadas de categoría E1 y E2 se considerarán análogas a un material granular, independientemente de



que su capa superior esté estabilizada con cal o con cemento. Por otro lado, las explanadas de categoría E4 se considerarán análogas a los materiales tratados con cemento.

Salvo que se disponga de estudios que permitan o aconsejen el empleo de otros valores diferentes se utilizarán los que se incluyen en la tabla 17.

**Tabla 17 - Características mecánicas de los materiales con cemento**

Categoría	Tipo	$E_{\min}$ [MPa]	$E_{\max}$ [MPa]	$E_{\text{MED}}$ [MPa]	v	a	$R_{FLP}$
Hormigón	HF-4,5	30.000	38.000	35.000	0,25	0,065	5,50
	HF-4,0	27.000	35.000	32.000	0,25	0,065	4,80
	HF-3,5	25.000	35.000	29.000	0,25	0,065	4,20
Suelocemento	SC	2.000	8.000	6.000	0,25	0,065	0,90
Gravacemento	GC	18.000	22.000	20.000	0,25	0,065	1,60
Hormigón magro	HM	20.000	30.000	24.000	0,25	0,065	3,00
Suelo estabilizado in situ	S-EST1	100	300	150	0,35	-	-
	S-EST2	200	600	350	0,35	-	-
	S-EST3	1.000	3.000	1.500	0,25	0,065	0,45
Macizo semiindefinido	E4	280	400	300	0,30	-	-

Las capas de firme constituidas por materiales tratados con cemento compactados con rodillo deberán ser extendidas en tongadas de un espesor mínimo de 20 cm y un espesor máximo de 30 cm.

Con el objetivo de controlar y limitar la reflexión de fisuras de retracción de las capas tratadas con cemento en la superficie del pavimento, será necesario prefisurar dichas capas con una distancia entre juntas transversales de contracción que dependerá de la categoría del tráfico pesado, de la zona climática en la que se ubique la obra, y de la naturaleza de la propia capa, tal y como se indica en la tabla 18.

**Tabla 18 - Distancia entre juntas transversales de contracción [m]**

Categoría de tráfico pesado	Zona térmica	Suelocemento	Gravacemento
T00 a T22	ZT1	3,5	3,0
	ZT2	3,0	2,5
	ZT3 y ZT4	4,0	3,5
T31 a T42	ZT1	-	3,5
	ZT2	4,0	3,0
	ZT3 Y ZT4	-	4,0

Los suelos estabilizados in situ cumplirán las prescripciones del Artículo 512 “Suelos estabilizados in situ” del Pliego PG-3. Por su parte, el suelocemento y la gravacemento cumplirán las prescripciones del Artículo 513 “Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)” del Pliego PG-3, con las siguientes modificaciones:

- La granulometría del material empleado en la fabricación del suelocemento no deberá ajustarse a ningún huso. El tamaño máximo no será superior a 40 mm.
- No se fijarán límites máximos a la resistencia media a compresión a siete días, cuando las capas de suelocemento o gravacemento se prefisuren.

En los pavimentos de hormigón en masa con pasadores en las juntas transversales, éstas se dispondrán con una separación de 5,0 m. En los pavimentos sin pasadores, la distancia entre juntas transversales de contracción será de 4,0 m en las zonas térmicas ZT3 y ZT4, y de 3,5 m en las ZT1 y ZT2.

Con tráfico de proyecto T32 o superiores, las juntas longitudinales irán provistas de barras de unión y se sellarán en todos los casos. Respecto al sellado de las juntas transversales, tanto de contracción como de hormigonado, según la zona pluviométrica, se proyectará de acuerdo al siguiente criterio:

- Zona pluviométrica ZP1: podrán dejarse sin sellar.
- Zona pluviométrica ZP2: selladas como las juntas longitudinales.

Se proyectarán juntas transversales de dilatación ante estructuras o donde pudiera estar especialmente impedido el movimiento de las losas del pavimento. En estos casos en la fase de proyecto se estudiará el diseño específico de dichas juntas.

En las curvas con radio inferior a 200 m será precisa la realización de un estudio especial sobre la disposición de juntas transversales de contracción o de dilatación, con el fin de limitar las posibles tensiones que pudieran producirse por el efecto de las temperaturas. A falta de dicho estudio, en la mayoría de los casos podrá ser suficiente con la disposición de juntas de dilatación al comienzo y al final de la curva, manteniendo la longitud de las losas adoptada para el conjunto de la obra.

Las bases de hormigón magro cumplirán las prescripciones del Artículo 551 “Hormigón magro vibrado” del Pliego PG-3, con las siguientes modificaciones:

- La resistencia media a compresión simple a 7 días será igual o superior a 8 MPa.

Por su parte, los pavimentos de hormigón vibrado cumplirán las prescripciones del Artículo 550 “Pavimentos de hormigón” del Pliego PG-3, con las siguientes modificaciones:

- Los pasadores irán provistos de una funda de plástico antiadherente al menos en la mitad y cumplirán con las prescripciones de la Norma UNE-EN 13877-3.
- De acuerdo con el tipo de producto de sellado que se emplee, éste deberá cumplir las prescripciones de la Norma UNE-EN 14188-1 (productos aplicados en caliente), UNE-EN 14188-2 (productos de sellado aplicados en frío) ó UNE-EN 14188-3 (perfiles preformados).

- Cuando se prevea la extensión de una capa de rodadura de mezcla bituminosa sobre un pavimento de hormigón armado continuo, el curado se realizará con emulsión bituminosa o mediante cubrición con lámina plástica. En dicho caso, con carácter previo a la extensión de la mezcla bituminosa de rodadura, se aplicará el correspondiente riego de adherencia.

### 6.2.3 Materiales no tratados.

Puesto que las características mecánicas de los materiales no tratados (materiales granulares y suelos naturales) dependen de la humedad de la capa, los cálculos que se realicen para el dimensionamiento de la sección deben contemplar valores de humedad representativos de las condiciones específicas del proyecto, de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.3 de esta norma.

El control de las deformaciones permanentes acumuladas en los materiales no tratados se establece mediante la limitación de la máxima deformación vertical de compresión en la capa (que suele localizarse en su fibra superior):

$$\varepsilon_z = a \cdot N_f^{-b}$$

Además, para evitar que se produzcan descompresiones en las capas constituidas por materiales no tratados, se debe cumplir la condición de que la tensión horizontal máxima en las mismas sea inferior a la suma de la tensión vertical máxima más el peso propio del firme sobre ellas (de espesor  $h_F$  cm), asumiendo una densidad simplificada de éste de 2,20 t/m<sup>3</sup>:

$$\sigma_h \leq \sigma_z + 2,20 \cdot 10^{-3} \cdot h_F$$

Cuando no se conozcan exactamente las características de las capas que forman el cimiento, las explanadas de categoría E1 y E2 se considerarán análogas a un material granular, independientemente de que su capa superior esté estabilizada con cal o con cemento.

El módulo de elasticidad de las zahorras depende de la capacidad de soporte de las capas subyacentes (expresada a través de su módulo de elasticidad  $E_S$ ) y del espesor de la propia capa ( $h$ ). Salvo que se disponga de estudios que permitan o aconsejen el empleo de otros valores diferentes se utilizarán los que se incluyen en la tabla 19.

**Tabla 19 - Características mecánicas de los materiales no tratados**

Categoría	Tipo	$E_{\min}$ [MPa]	$E_{\max}$ [MPa]	$E_{MED}$ [MPa]	$\nu$	$a$	$b$
Zahorra artificial <sup>(1)</sup>	ZA	80	600	$0,206 \cdot h^{0,45} \cdot E_s$	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Macizo semi-indefinido	E1	35	65	50	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E2	70	105	85	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E3	155	280	215	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Suelo natural	-	30	250	$10 \cdot CBR$	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25

<sup>(1)</sup> Para el cálculo de  $E_{MED}$  se aplicará la expresión indicada, en la que  $E_s$  es el módulo del macizo semi-indefinido, tongada, o capa subyacente en MPa, y  $h$  es el espesor en mm de la tongada para la que se calcula el módulo de elasticidad, obteniéndose el resultado en MPa.

Las capas de firme y las empleadas en la formación de la parte superior del cimiento constituidas por materiales no tratados deberán ser extendidas en tongadas de un espesor mínimo de 20 cm (15 cm en el caso de arcenes) y un espesor máximo de 30 cm.

#### 6.2.4 Otros materiales.

Además de los materiales relacionados anteriormente, podrán utilizarse los que el proyectista, previa justificación técnica y económica, considere oportunos, entre los siguientes:

- Riegos con gravilla.
- Mezclas bituminosas abiertas en frío.
- Gravaemulsión.
- Gravaescoria.
- Macadam.

Tanto su caracterización mecánica como las funciones de transferencia empleadas en su caso deberán estar convenientemente justificadas.

### 6.3. Evaluación económica de las secciones de firme.

#### 6.3.1 Introducción.

Con la evaluación económica de los firmes se pueden pretender dos objetivos diferentes. El primero se puede enmarcar en las tareas de planificación de la Administración: comparar diferentes tipos de soluciones de manera que se puedan establecer directrices de carácter general que, en cualquier caso, deberán ser revisadas al materializarlas en un proyecto concreto. El segundo objetivo consiste en la estimación, para una sección

determinada, de cuáles son, en las condiciones concretas del proyecto, los costes de construcción y, en su caso, los de conservación que se van a producir en el futuro. Para determinar estos costes es necesario conocer, entre otros, aspectos tales como la situación geográfica de la obra, su volumen, la disponibilidad de materiales de construcción, el equipamiento del que disponen las empresas que pueden ser adjudicatarias de la obra, la época del año en la que se van a ejecutar los trabajos, etc. En definitiva, esta evaluación económica es la que hay que llevar a cabo mediante un estudio detallado en el momento de redactar el proyecto, pudiendo existir notables diferencias de un caso a otro, aun habiendo escogido en ambos la misma solución técnica.

Los criterios para llevar a cabo una evaluación económica dependen del organismo que la realice (Administración pública, empresa privada o entidad financiera), de su alcance (evaluación de planes o de proyectos) y de la posibilidad de expresar contablemente los costes y beneficios que se producen a lo largo del tiempo que se considere en el análisis. El criterio que se utiliza habitualmente cuando se trata de proyectos de obras promovidas por las administraciones públicas es el del valor actualizado neto (VAN), el cual expresa la diferencia entre la suma de los beneficios actualizados netos y la suma de los costes actualizados netos, y es uno de los índices de significado más claro en la valoración económica de proyectos, por cuanto resulta más interesante aquél en que el VAN sea mayor (o menos negativo, si los costes superan a los beneficios).

Los análisis económicos deben extenderse a un determinado período o *ciclo* vital, que es el tiempo para el que se quiere que el coste global actualizado sea mínimo. A veces se considera un período de análisis económico igual al período de proyecto de las distintas secciones de firme. Sin embargo, no se debe confundir un concepto meramente económico con otro de significado estrictamente técnico. Debe tenderse a elegir un período de análisis tal que la influencia de la tasa de actualización que se escoja sea lo menor posible, para así conseguir objetivar al máximo el proceso. Para ello, debe irse a períodos de análisis inferiores a 5 años (lo que no tiene sentido) o superiores a 35.

En esta norma se considera como más apropiado tomar un período de análisis de 40 años. De esta forma cabe incluir en el análisis económico todas las operaciones que puedan tener lugar desde el momento de la construcción del firme, incluyendo las operaciones de rehabilitación que sean necesarias tras la finalización del período de proyecto para seguir aprovechando la infraestructura existente. Por otro lado, este período de análisis permite comparaciones entre secciones de firme que son diseñadas para períodos de proyecto diferentes entre sí.

Para poder sumar los diferentes costes que se producen a lo largo del período de análisis y hallar el coste global de una sección es preciso una actualización de los que se producen en diferentes momentos. La tasa de actualización  $a$  que se fije es pues un parámetro fundamental del cálculo. Para la evaluación de inversiones públicas, se suele trabajar con tasas de actualización variando entre el 4 y el 15 %. Para proyectos de infraestructuras de transporte es habitual adoptar el valor  $a = 6$  %. En todo caso, será la Administración la que fije qué tasa de actualización debe ser utilizada en cada momento.

La elección de una determinada tasa tiene gran influencia en el resultado de los estudios económicos. Si la tasa elegida es alta, las estrategias de inversión que resultan más favorables son las que tienen menores inversiones iniciales (suponiendo, por tanto, menor durabilidad en principio) y prevén para el futuro bastantes rehabilitaciones de mediana durabilidad. Estas estrategias pueden resultar peligrosas, pues el estado del firme puede bajar del mínimo aceptable si no se cumple estrictamente lo planificado. Por el contrario, tasas bajas favorecen estrategias marcadas por inversiones iniciales altas que retrasan la necesidad de rehabilitaciones importantes. Su aplicación exige, sin embargo, que no haya restricciones presupuestarias.

En los análisis económicos se considera que la tasa de actualización se mantiene constante a lo largo de todo el período de análisis (al contrario de lo que suele suceder con los tipos de interés en los análisis financieros). Por otro lado, se recomienda trabajar con *euros constantes*, es decir, no considerar incluida la inflación en la tasa de actualización.

### 6.3.2 Costes de construcción.

La forma habitual de determinar los costes de construcción en las obras públicas parte del hecho (no estrictamente cierto, sin embargo) de que no hay diferencia entre quien suministra los materiales y quien los pone en obra. Los costes finales se obtienen así como la suma de los correspondientes a cada una de las unidades de obra definidas en el pliego de prescripciones técnicas (precios unitarios). A su vez, resulta habitual justificar los costes de cada unidad de obra como la suma de cuatro componentes:

- Costes de los materiales.
- Costes de la mano de obra.
- Costes de la maquinaria.
- Costes indirectos.

Al coste final obtenido como suma del de las distintas unidades de obra (precio unitario multiplicado por la medición de esa unidad) se le denomina habitualmente coste de ejecución material. Este debe ser incrementado en los porcentajes que la Administración tenga establecidos como de gastos generales o de estructura y de beneficio industrial, así como el correspondiente al impuesto sobre el valor añadido (IVA). Se obtiene así finalmente el presupuesto base de licitación.

### 6.3.3 Costes de los usuarios.

Hay que distinguir entre dos clases de costes que el usuario debe soportar: los costes genéricos de explotación y los costes específicos asociados a operaciones de conservación o de rehabilitación.

Los costes genéricos de explotación pueden a su vez agruparse en cuatro categorías:

- Gastos de funcionamiento del vehículo: consumo de combustible, lubricantes, neumáticos, piezas de repuesto, reparaciones y depreciación.
- Costes relacionados con el tiempo de recorrido.
- Costes de los accidentes.
- Costes asociados a la comodidad de los usuarios.

Estos costes genéricos de explotación dependen de la regularidad superficial, de la resistencia al deslizamiento y de la velocidad, estando dichas variables relacionadas entre sí. Por ejemplo, al disminuir la regularidad, aumentando el desgaste del vehículo y la incomodidad del usuario, disminuye así mismo la velocidad, aumentando el tiempo de recorrido y disminuyendo el consumo de combustible y la gravedad de los accidentes. Además, la velocidad también está influida por el nivel de servicio que la carretera proporciona, disminuyendo cuando aumenta la intensidad de la circulación. No existen suficientes datos sobre la influencia del comportamiento del pavimento sobre los costes del usuario asociados a la explotación normal de la carretera. Pero mientras el estado del pavimento se mantenga dentro de unos límites aceptables, la diferencia de costes atribuible a comportamientos distintos es de difícil estimación y probablemente pequeña. En todo caso, la Administración no suele incluir este concepto en sus estudios de rentabilidad.

Por otro lado, las operaciones de conservación y de rehabilitación, por llevarse a cabo generalmente con circulación, inducen en los usuarios unos costes específicos asociados a esas operaciones y que dependen de:

- La programación de las obras.
- La intensidad de la circulación.
- La regulación que se haga de esa circulación.

La estructura de estos costes es igual a la de los costes genéricos de explotación. Pero en este caso el factor predominante es el relacionado con la demora provocada por la limitación de velocidad. En menor grado, siempre que los trabajos se señalicen adecuadamente, están los costes derivados de accidentes.

Con bajas intensidades de circulación los vehículos habrán de reducir su velocidad normal hasta una velocidad limitada (e incluso en ocasiones habrán de detenerse si así lo exige la regulación de la circulación); con dicha velocidad limitada se transitará por la zona de obras hasta que, rebasada ésta, se pueda recuperar la velocidad normal. Si la intensidad de la circulación supera la capacidad de la regulación dispuesta se producirán retenciones y la demora y el consumo de combustible aumentarán notablemente. Por tanto, tener en cuenta estos costes con altas intensidades de circulación puede influir decisivamente en la elección de la estrategia de conservación más adecuada: interesarán los firmes más duraderos y que exijan el menor número de operaciones de rehabilitación, que también habrán de ser lo más duraderas posible.

#### 6.3.4 Costes de conservación y costes globales.

El coste global de una sección de firme viene dado por la siguiente expresión:

$$C = C_1 + C_2 - C_3 + C_4 \quad [1]$$

donde:

- $C$  es el coste global de la sección.
- $C_1$  es el coste de construcción (inversión inicial).
- $C_2$  es el coste de conservación, incluyendo tanto los costes de las operaciones ordinarias como los costes de rehabilitaciones que se producen durante el período al que se extiende el análisis económico, todos ellos actualizados al año de la construcción.
- $C_3$  es el valor residual de la sección al final del período al que se extiende el análisis económico y actualizado al año de la construcción.
- $C_4$  representa el conjunto de costes, también convenientemente actualizados, que soportan los usuarios de la carretera como consecuencia de las labores de conservación: demoras, gastos adicionales de combustible, etc.

El coste de conservación está formado por dos sumandos y viene dado por la expresión:

$$C_2 = C_{21} + C_{22} \quad [2]$$

donde:

- $C_{21}$  son los costes de conservación ordinaria a lo largo del período de análisis.
- $C_{22}$  son los costes de las rehabilitaciones u operaciones de conservación extraordinarias realizadas durante el período de análisis.

Los costes de conservación ordinaria  $C_{21}$  pueden ser evaluados de dos formas diferentes. La primera consiste en estimar las distintas operaciones que han de ser llevadas a cabo durante el período de proyecto, calculando sus respectivos costes y actualizándolos al año de la construcción. Esta es la mejor forma si se dispone de bases de datos sobre las necesidades reales de conservación ordinaria de cada sección y es igual que la que se sigue para los costes de rehabilitación.

La segunda forma de evaluar los costes de conservación ordinaria consiste en suponer que en cada uno de los años del período de análisis el gasto que se produce por ese concepto es un porcentaje  $b$  del coste de construcción  $C_1$  de la sección de que se trate.



Por tanto:

$$C_{21} = b/100 \cdot C_1 \cdot \left[ (1+a)^{-1} + (1+a)^{-2} + \dots + (1+a)^{-40} \right] \quad [3]$$

Si se considerase  $a = 6 \%$ ,

$$C_{21} = 0,1505 \cdot b \cdot C_1 \quad [4]$$

Para poder evaluar los costes de las rehabilitaciones  $C_{22}$  es preciso prever qué operaciones de ese tipo se van a realizar durante el período de análisis. Si se han previsto, por ejemplo, actuaciones extraordinarias de conservación a los 10, 20, 30 y 35 años, de coste respectivo  $R_{10}$ ,  $R_{20}$ ,  $R_{30}$  y  $R_{35}$ , el coste actualizado del conjunto de las mismas vendrá dado por la expresión:

$$C_{22} = R_{10} \cdot (1+a)^{-10} + R_{20} \cdot (1+a)^{-20} + R_{30} \cdot (1+a)^{-30} + R_{35} \cdot (1+a)^{-35} \quad [5]$$

Si se considerase  $a = 6 \%$ ,

$$C_{22} = 0,56 \cdot R_{10} + 0,31 \cdot R_{20} + 0,17 \cdot R_{30} + 0,13 \cdot R_{35} \quad [6]$$

El valor residual  $C_3$  de una sección de firme es lo que esta sección cuesta al final del período de análisis. Se puede evaluar de muy diversas formas. Una de ellas es como un porcentaje  $V$  del coste de construcción  $C_1$  convenientemente actualizado (aunque según algunos autores, sólo habría que considerar el coste de los materiales y no el de la puesta en obra):

$$C_3 = V/100 \cdot C_1 \cdot (1+a)^{-40} \quad [7]$$

Si se considerase  $a = 6 \%$ ,

$$C_3 = 0,0010 \cdot V \cdot C_1 \quad [8]$$

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el valor residual depende también en gran medida del coste de las operaciones de conservación que se hayan ido realizando a lo largo de dicho período de análisis. De todos modos, el valor residual suele influir poco en los análisis económicos, pues se sitúa al final del período, y tanto menos cuanto más alta sea la tasa de actualización.

En definitiva, el coste global de una sección vendrá dado por la expresión siguiente:

$$C = C_1 + b/100 \cdot C_1 \cdot \left[ (1+a)^{-1} + (1+a)^{-2} + \dots + (1+a)^{-40} \right] + R_{10} \cdot (1+a)^{-10} + R_{20} \cdot (1+a)^{-20} + R_{30} \cdot (1+a)^{-30} + R_{35} \cdot (1+a)^{-35} - V/100 \cdot C_1 \cdot (1+a)^{-40} + C_4 \quad [9]$$

Si se considerase  $a = 6 \%$ ,

$$C = C_1 + 0,1505 \cdot b \cdot C_1 + 0,56 \cdot R_{10} + 0,31 \cdot R_{20} + 0,17 \cdot R_{30} + 0,13 \cdot R_{35} - 0,0010 \cdot V \cdot C_1 + C_4 \quad [10]$$

#### 6.4 Estrategias de conservación.

En el proyecto, las secciones de firme no descartadas en una primera fase de evaluación técnica han de compararse, como se ha indicado en el apartado anterior, desde el punto de vista de sus costes de construcción y, en última instancia, de sus costes globales, incorporando para ello los costes de conservación ordinaria y los de rehabilitación estimados para el período de análisis establecido (así como, si fuese posible, los inducidos en los usuarios como consecuencia de las actuaciones de conservación).

El cálculo de los costes de construcción debe hacerse a partir de las secciones tipo establecidas para tramos rectos y por unidad de longitud, incluyendo, por tanto, los arcones. Así mismo, se ha de incluir el coste de la formación de la explanada, tanto en la opción de empleo de suelos de aportación como en la de estabilización in situ por incorporación de cal o de cemento. En las mediciones de las secciones se han de añadir los sobrecanchos y los derrames que correspondan. Los costes unitarios empleados serán los de ejecución material, con la precisión a la que se haya llegado en el proyecto de trazado.

Los costes globales han de incluir, como ya se ha expuesto, tanto los de construcción como, convenientemente actualizados, los de conservación a lo largo del período de análisis, y el valor residual que se le pueda suponer a cada sección al final de dicho período. Los costes de conservación se establecerán de acuerdo con hipótesis verosímiles y suficientemente justificadas de estrategias de conservación ordinaria y de rehabilitación periódica para cada sección durante el período de análisis económico. Como mínimo, se han de considerar dos estrategias diferentes. De todas formas, para simplificar el proceso, la valoración de los costes de conservación se puede reducir a la sección de menor coste de construcción y a aquellas otras que no lo superen en más de un 20 %. Finalmente la sección de firme elegida será la que presente un coste global actualizado más bajo.

La estrategia de conservación y de rehabilitación de un tramo de carretera con características homogéneas se puede definir como el conjunto de actuaciones que sería preciso desarrollar durante su vida útil para que los indicadores de comportamiento del firme no traspasaran los límites establecidos. Su elaboración está vinculada a numerosos factores, de índole tanto técnica como económica:

- Tráfico.
- Disponibilidad de materiales.
- Tipo de sección estructural del firme.
- Medios humanos y materiales disponibles.
- Asignaciones presupuestarias anuales o plurianuales.
- Etc.

El objetivo de una estrategia de conservación y de rehabilitación debe ser, con las restricciones correspondientes, lograr la más larga vida del firme con el menor coste. Esto lleva lógicamente a que no todas las estrategias que pudieran plantearse técnicamente sean económicamente adecuadas, pero todas ellas pueden incluirse en dos grandes grupos:

- El primer grupo de estrategias está formado por las que prevén fundamentalmente unas grandes operaciones de rehabilitación que han de realizarse en momentos concretos y muy separados en el tiempo, y que intentan restituir prácticamente las condiciones iniciales del firme.
- El otro grupo comprende las estrategias en las que se prevén principalmente unas operaciones frecuentes, de manera que las características iniciales del firme se vayan perdiendo con la mayor lentitud posible.

Las estrategias de conservación y de rehabilitación que deben ser consideradas para la determinación de los costes globales de las secciones de firme consideradas técnicamente adecuadas en el proyecto deben ser, según se ha indicado, como mínimo dos, en cuyo caso cada una de ellas debe estar encuadrada en los dos grupos que se acaban de describir. En todo caso, el proyectista solicitará de los correspondientes servicios de conservación las informaciones necesarias para establecer primero esas estrategias y, seguidamente, valorarlas económicamente.

## **7 ARCENES.**

### **7.1 Generalidades.**

Salvo justificación en contrario, el firme de los arcenes de anchura no superior a 1,00 m será, por razones constructivas, prolongación del firme de la calzada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre la calzada y el arcén.

En arcenes de anchura superior a 1,00 m, su firme dependerá de la categoría de tráfico pesado prevista para la calzada y de la sección adoptada en ésta; se evitará en lo posible la aparición de nuevas unidades de obra. Salvo justificación en contrario, se adoptará una de las soluciones que se indican en los apartados siguientes, que están previstas para unas solicitaciones del tráfico pesado acordes con las funciones propias de los arcenes.

Para las categorías de tráfico pesado T00 a T31 y en las vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías es preceptivo, por exigencias de seguridad de la circulación vial, que los arcenes dispongan de una capa de rodadura completa transversalmente y con la misma rasante que la calzada, de manera que no haya un escalón entre ambas superficies.

En el caso de que, de acuerdo con los estudios de tráfico, se consideren probables solicitaciones más intensas que las que en principio corresponderían a la categoría de tráfico pesado adoptada, será posible justificar, con carácter excepcional, secciones de los arcenes de mayor capacidad estructural que las indicadas en este apartado, previa autorización de la Direcció General d'Obres Públiques de la Conselleria d'Infraestructures i Transport. En este supuesto se podría llegar incluso a disponer el mismo firme que en la calzada, aprovechando las ventajas constructivas y permitiendo así en caso necesario utilizar los arcenes como carriles adicionales o, si a medio plazo fuera previsible, ensanchar la calzada a costa del arcén sin obligaciones constructivas adicionales.

### **7.2 Categorías de tráfico pesado T00 a T21.**

En los firmes con capa de rodadura bituminosa, en todos los casos las capas de rodadura e intermedia del arcén serán prolongación de las dispuestas en la calzada y, por tanto, de idéntica naturaleza. Su espesor no bajará en ningún caso de 15 cm sobre zahorras artificiales y de 10 cm sobre capas tratadas con cemento.

Debajo del pavimento del arcén se podrá optar por disponer:

- Suelocemento, procurando enrasar con la cara inferior de las mezclas bituminosas de la calzada y en todo caso con el espesor mínimo indicado en el apartado 6.2.2. Esta solución con suelocemento, que preceptivamente será prefisurado con los espaciamientos indicados en la tabla 18, será preferente

cuando se emplee este tipo de material o gravacemento en la calzada. El resto del espesor, hasta alcanzar la explanada, se completará con zahorra artificial.

- Zahorra artificial, procurando enrasar con la cara inferior de las mezclas bituminosas de la calzada y en todo caso con las limitaciones de espesores especificadas en el apartado 6.2.3.

Si se justifica por razones constructivas, y en el caso de que no se emplee en el firme de la calzada, en las categoría de tráfico pesado T1 o T21 el suelocemento podrá sustituirse por un suelo seleccionado o adecuado estabilizado in situ con cemento tipo S-EST3, con una resistencia a compresión simple a 7 días no inferior a 2,5 MPa y prefisurado con los espaciamentos indicados en la tabla 18.

En los firmes con pavimento de hormigón, en las categorías de tráfico pesado T00 y T0, el pavimento del arcén será de hormigón en masa, de idénticas características que el utilizado en la calzada, y con un espesor mínimo de 15 cm, salvo en sus 50 cm interiores, en los que su espesor deberá coincidir, en todo caso, con el correspondiente al de la calzada. Hasta alcanzar la explanada se dispondrá una zahorra artificial o un suelocemento. El pavimento del arcén irá atado al pavimento de la calzada mediante barras de unión.

Para la categoría de tráfico pesado T1 y T21 los arcenes podrán pavimentarse con hormigón en masa o con mezcla bituminosa. Si se pavimentan con hormigón en masa se podrá utilizar una solución igual a la indicada para las categorías de tráfico pesado T00 y T0. Alternativamente se podrá pavimentar el arcén con hormigón magro de espesor uniforme, igual al pavimento de la calzada, con juntas transversales de contracción y atado a éste mediante barras de unión; hasta alcanzar la explanada se dispondrá una zahorra artificial o un suelocemento. Si se dispusiese un arcén con pavimento de mezcla bituminosa en caliente, sus características serán similares a las especificadas en el caso de calzadas con pavimento también de mezcla bituminosa.

La junta entre un pavimento de calzada de hormigón y un arcén también de hormigón deberá sellarse siempre.

### **7.3 Categorías de tráfico pesado T22 y T31.**

El pavimento del arcén constará de una capa de mezcla bituminosa con el mismo espesor que la capa de rodadura del firme de la calzada, salvo si ésta fuera de los tipos PA o BBTM, en cuyo caso el pavimento del arcén se constituirá con las mismas capas de rodadura e intermedia que el firme de la calzada, de forma que vayan enrasadas las capas intermedias.

Debajo del pavimento del arcén se dispondrá zahorra artificial hasta alcanzar la explanada; en todo caso las tongadas cumplirán las limitaciones de espesores contenidas en el apartado 6.2.3. Alternativamente, se podrá disponer bajo el pavimento una capa de suelocemento prefisurado con los espaciamentos indicados en la tabla 18 y con un espesor

dentro de los límites indicados en el apartado 6.2.2; el resto, hasta llegar a la explanada, se completará con zahorra artificial. En este caso el suelocemento podrá sustituirse por un suelo seleccionado o adecuado estabilizado in situ con cemento tipo S-EST3, con una resistencia a compresión simple a 7 días no inferior a 2,5 MPa y prefisurado con los espaciamientos indicados en la tabla 18.

#### **7.4 Categorías de tráfico pesado T32 a T42.**

El arcén, enrasado siempre con la calzada, podrá no estar pavimentado, o tener un pavimento constituido por un riego con gravilla. El firme del arcén estará constituido por zahorra artificial, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada; y el resto, hasta la explanada, podrá ser de zahorra artificial o de suelo seleccionado. Si no se pavimentase se proyectarán arceles con zahorras cuyos finos tengan un índice de plasticidad (IP) entre 6 y 10.

En vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías el arcén tendrá un pavimento constituido por un tratamiento superficial, el cual podrá no disponerse en los demás casos. La capa de base estará constituida por zahorra artificial, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada; el resto, hasta llegar a la explanada, será de zahorra, o de suelo seleccionado con un CBR  $\geq 20$  en las condiciones especificadas de puesta en obra.

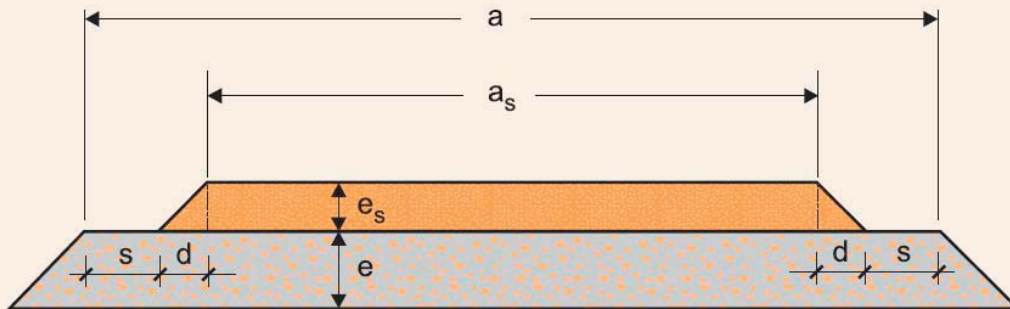
## 8 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.

La anchura de la capa de rodadura rebasará a la teórica al menos en 20 cm por cada borde.

Cada capa del firme tendrá una anchura ( $a$ ) en su cara superior, igual a la de la capa inmediatamente superior ( $a_s$ ) más la suma de los sobreamanchos ( $d$ ) y ( $s$ ) indicados en la tabla 20. El sobreamancho ( $s$ ) podrá aumentarse si existe necesidad de disponer de un apoyo para la extensión de la capa superior.

**Tabla 20 - Valores de sobreamanchos**

Sobreamancho	Material	Valor [cm]
Por derrames ( $d$ )	Pavimento de hormigón	0
	Hormigón magro	0
	Todos	$e_s$
Por criterios constructivos ( $s$ )	Mezclas bituminosas	5
	Hormigón magro	20
	Otros materiales con cemento	6 a 10
	Capas granulares	10 a 15



$$a = a_s + 2d + 2s$$

## 9 DEFINICIONES.

- **ARCÉN:** A efectos de aplicación de esta norma, se define como la franja longitudinal contigua a la calzada, dotada de firme, pero no destinada al uso por parte de vehículos automóviles más que en circunstancias excepcionales.
- **BERMA:** Franja longitudinal contigua al arcén, si existe, en el borde de la plataforma. Es una zona de seguridad y se utiliza para la eventual circulación de peatones y colocación de elementos auxiliares de la carretera.
- **CALZADA:** Parte de la carretera destinada a la circulación de vehículos. Se compone de uno o de varios carriles.
- **CAPA DE BASE:** Capa del firme situada debajo del pavimento cuya misión es eminentemente estructural.
- **CAPA DE RODADURA:** Capa superior o única de un pavimento de mezcla bituminosa.
- **CAPA DE SUBBASE:** Capa del firme situada inmediatamente debajo de la capa de base y sobre la explanada, que puede no existir o, por el contrario, estar compuesta por varias capas.
- **CAPA ESTRUCTURAL:** véase **CAPA DE BASE**.
- **CAPA INTERMEDIA:** Capa de un pavimento de mezcla bituminosa situada debajo de la capa de rodadura.
- **CAPACIDAD DE SOPORTE:** Aptitud de un suelo, terraplén, desmonte o explanada para soportar las cargas de tráfico transmitidas a través de la sección de firme.
- **CARRIL:** Cada una de las franjas longitudinales en las que puede estar dividida la calzada, delimitada o no por marcas viales longitudinales, y con anchura suficiente para la circulación de una fila de automóviles que no sean motocicletas.
- **CARRIL DE PROYECTO:** Carril por el que circula el mayor número de vehículos pesados en una calzada.
- **CATEGORÍAS DE EXPLANADA:** Tipos de explanada que se establecen, según su capacidad resistente, a los efectos de dimensionamiento de la sección estructural del firme.
- **CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO:** Intervalos que se establecen, a los efectos del dimensionamiento de la sección estructural del firme, para la intensidad media diaria de vehículos pesados ( $IMD_P$ ) o para el tráfico equivalente de proyecto ( $TEP_{128kN}$ ), según sea el nivel de calidad de la información disponible sobre del tráfico pesado.



- **CIMIENTO DEL FIRME:** Conjunto de capas de suelos naturales, suelos estabilizados u otros materiales que se encuentra bajo el plano de la explanada, que comprende la propia explanada y el terreno natural subyacente.
- **COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD (CA):** Número de ejes equivalentes de 128 kN ( $EE_{128kN}$ ) que ejercen el mismo daño sobre el firme que el producido por el conjunto de ejes de un vehículo pesado determinado, a efectos del dimensionamiento de la sección de un firme.
- **COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD MEDIO (CAM):** Valor promedio de los coeficientes de agresividad (CA) de los vehículos pesados. Este coeficiente puede aplicarse al conjunto total del tráfico pesado (CAM), o por separado para cada una de las categorías de vehículo pesado consideradas ( $CAM_i$ ).
- **DESMONTE:** Excavación por debajo de la cota del nivel natural del terreno para realizar la explanación de una carretera.
- **EJE EQUIVALENTE ( $EE_{128kN}$ ):** Eje de referencia para el dimensionamiento de la sección de firme y para la caracterización del tráfico pesado; se trata de un eje simple con ruedas gemelas, que soporta una peso total de 13 t, ejerciendo una presión teórica de contacto de 900 kPa, y cuya separación entre centros de ruedas es, a efectos de cálculo, de 31,92 cm.
- **EJE SIMPLE:** Aquel que dista del eje más próximo más de 1,50 m.
- **EJE TÁNDEM O DOBLE:** Conjunto de dos ejes acoplados, tal que la distancia entre ellos es inferior a 1,50 m.
- **EJE TRÍDEM O TRIPLE:** Conjunto de tres ejes acoplados, tal que la distancia entre cada dos de ellos consecutivos es inferior a 1,50 m.
- **ESTRUCTURA DEL FIRME:** Véase **SECCIÓN DE FIRME**.
- **EXPLANADA:** Superficie superior del cimiento de un firme, sea en desmonte o en terraplén, sobre la que se apoya el firme.
- **FIRME:** Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados y, generalmente, tratados, que constituyen la superestructura de la plataforma, resiste las cargas del tráfico y permite que la circulación tenga lugar con seguridad y comodidad.
- **FIRME FLEXIBLE:** Firme constituido por capas granulares no tratadas y, en general, por mezclas bituminosas, aunque en ocasiones puede haber sobre aquéllas sólo un tratamiento superficial.
- **FIRME RÍGIDO:** Firme con pavimento de hormigón.

- **FIRME SEMIRRÍGIDO:** Firme constituido por un pavimento bituminoso de cualquier espesor sobre una o más capas de gravacemento o de suelocemento, con espesor conjunto de éstas igual o superior a 20 cm.
- **FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:** Expresión matemática que permite estimar el número de aplicaciones de carga que un material puede soportar hasta su agotamiento, en función de un determinado parámetro característico de su comportamiento estructural.
- **GRAVACEMENTO:** Mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y ocasionalmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se puede utilizar como capa estructural en firmes de carreteras.
- **HORMIGÓN MAGRO:** Mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y aditivos, empleada en capas de base bajo pavimento de hormigón, que se pone en obra con una consistencia tal que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación.
- **INTENSIDAD MEDIA DIARIA (IMD):** Número total de vehículos que circulan por una sección transversal de la carretera durante un año, dividido entre 365.
- **INTENSIDAD MEDIA DIARIA DE VEHÍCULOS PESADOS (IMD<sub>p</sub>):** Número total de vehículos pesados que circulan por una sección transversal de la carretera durante un año, dividido entre 365.
- **LECHADA BITUMINOSA:** Mezcla fabricada a temperatura ambiente, con una emulsión bituminosa, áridos, agua y aditivos, cuya consistencia es adecuada para su puesta en obra y puede aplicarse en una o varias capas.
- **MEZCLA BITUMINOSA ABIERTA EN FRÍO:** Combinación de una emulsión bituminosa, áridos con un contenido de finos reducido y aditivos, de manera que todas las partículas de árido queden recubiertas de una película de ligante. Su proceso de fabricación no implica calentar el ligante ni los áridos, y su puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- **MEZCLA BITUMINOSA DE ALTO MÓDULO:** Mezcla bituminosa en caliente en la que el valor del módulo de elasticidad a 20 °C es superior a 10.000 MPa.
- **MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE:** Combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y aditivos, de manera que todas las partículas de árido queden recubiertas de una película de ligante; su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos, y su puesta en obra se realiza a una temperatura sensiblemente superior a la ambiente.
- **MÓDULO DE ELASTICIDAD:** En un material de comportamiento esencialmente elástico es el cociente entre la tensión aplicada en un ensayo uniaxial y la deformación unitaria producida en el mismo eje.

- **PAVIMENTO:** Parte superior de un firme, que debe resistir directamente los esfuerzos producidos por la circulación, proporcionando a ésta una superficie de rodadura cómoda y segura.
- **PAVIMENTO DE HORMIGÓN:** Pavimento constituido por losas de hormigón en masa, separadas por juntas, o por una losa continua de hormigón armado; el hormigón se pone en obra con una consistencia tal que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación y maquinaria específica para su extensión y acabado superficial.
- **PERÍODO DE DISEÑO:** Período de tiempo en el que se pretende que el firme (o la capa que se considere) no presente una degradación estructural generalizada.
- **PLATAFORMA:** Zona de la carretera ocupada por la calzada, arcenes y bermas adyacentes.
- **SECCIÓN DE FIRME:** Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados colocado sobre la explanada para soportar las cargas del tráfico y permitir la circulación en condiciones de seguridad y comodidad. Constituye la estructura resistente de la calzada o arcén y comprende en general, de abajo arriba, las capas de subbase, base y pavimento.
- **SISTEMA VIARIO DE LA COMUNITAT VALENCIANA:** Conjunto de carreteras, considerando como tales las vías de dominio y uso público proyectadas y construidas, fundamentalmente, para la circulación de vehículos automóviles, sin menoscabo de la debida consideración que en cada caso requerirán otros modos de transporte, como el peatonal, y los caminos de dominio público de cualquier clase aptos, al menos, para el tránsito rodado, independientemente de sus características y titularidad, que discurran por el territorio de la Comunitat Valenciana. No forman parte del Sistema Viario las vías urbanas, salvo que tales vías tengan la condición legal de travesía.
- **SUELO GRANULAR:** Suelo constituido por arenas y gravas en su mayor parte.
- **SUELO ESTABILIZADO IN SITU:** Mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento y agua, realizada en la propia traza de la carretera, que tiene por objeto mejorar determinadas propiedades de aquél, en especial su susceptibilidad a la acción del agua.
- **SUELOCEMENTO:** Mezcla homogénea de materiales granulares (zahorra, suelo granular o productos inertes de desecho), cemento, agua y eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se puede utilizar como capa estructural en firmes de carretera.
- **TERRAPLÉN:** Relleno formado por extensión y compactación de suelos por encima de la cota del terreno natural.

- **TONGADA:** Capa de material de un determinado espesor, extendida de una vez sobre una superficie regular.
- **TRÁFICO EQUIVALENTE DE PROYECTO (TEP<sub>128kN</sub>):** Número acumulado de ejes equivalentes de 128 kN (EE<sub>128kN</sub>) previsto para el carril de proyecto durante el período de diseño del firme.
- **TRAMO:** Longitud de vía o carretera entre dos secciones transversales de su trazado.
- **TRAMO DE PROYECTO:** Cada una de las partes en que queda dividida la longitud de la vía o carretera, y que se caracterizan por unos factores de diseño homogéneos.
- **TRATAMIENTO SUPERFICIAL:** Técnica de pavimentación cuyo objetivo es dotar al firme de unas ciertas características superficiales, sin aumento directo y apreciable de la capacidad resistente.
- **VEHÍCULO PESADO:** A efectos de esta norma, vehículo cuya masa total, incluida su carga, sea igual o superior a 3,5 t.
- **VEHÍCULO PESADO RÍGIDO:** Vehículo pesado de más de cuatro ruedas y sin remolque.
- **VEHÍCULO PESADO ARTICULADO:** El compuesto por un elemento tractor (cabeza tractora) y de un elemento remolcado (semirremolque); éste está normalmente provisto sólo de ejes traseros, y apoya, transmite y se articula sobre aquél.
- **VÍA DE SERVICIO:** Camino sensiblemente paralelo a una carretera, respecto de la cual tiene carácter secundario, conectado a ésta solamente en algunos puntos, y que sirve a las propiedades o edificios contiguos. Puede ser de sentido único o de doble sentido de circulación.
- **VIDA ÚTIL:** véase **PERÍODO DE DISEÑO**.
- **ZAHORRA ARTIFICIAL:** Material granular, de granulometría continua, constituido por partículas total o parcialmente trituradas, utilizado como capa de firme.

## 10 SIGLAS Y ACRÓNIMOS.

- **IRI:** Índice de Regularidad Internacional [m/km o mm/m].
- **MPD:** Mean Profile Depth o profundidad media del perfil [mm].
- **ETD:** Estimated Texture Depth o profundidad estimada de textura [mm]. Se trata de una estimación estadística del resultado del ensayo de *mancha de arena*, obtenida a partir del valor de la **MPD**. En ausencia de estudios específicos puede emplearse la siguiente expresión

- $$ETD = 0,8 \cdot MPD + 0,2$$

- **MTD:** Mean Texture Depth o profundidad estimada de textura [mm]. Resultado del ensayo de *mancha de arena*.
- **CRL:** Coeficiente de Rozamiento Longitudinal. Es el cociente entre la fuerza horizontal que aparece en el punto de contacto entre neumático y pavimento en el mismo sentido de la marcha (o la proyección sobre esa dirección de una fuerza horizontal que tenga cualquier otra dirección) y la fuerza vertical que actúa sobre dicho punto de contacto. En la práctica, el valor del CRL depende del equipo que se emplee para su medida.
- **CRT:** Coeficiente de Rozamiento Transversal. Es el cociente entre la fuerza horizontal que aparece en el punto de contacto entre neumático y pavimento en el sentido perpendicular al de la marcha (o la proyección sobre esa perpendicular de una fuerza horizontal que tenga cualquier otra dirección) y la fuerza vertical que actúa sobre dicho punto de contacto. En la práctica, el valor del CRT depende del equipo que se emplee para su medida.

## **A PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES DE UNIDADES DE OBRA**

### **A.1 Zahorra artificial.**

#### **A.1.1 Introducción.**

El Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento establece con carácter general las condiciones mínimas que han de satisfacer los materiales y los procedimientos empleados en la construcción y el control de las distintas unidades de obra, en particular las utilizadas en la constitución de los firmes y pavimentos (Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, publicada en el Boletín Oficial del Estado de 6 de abril de 2004). Sin embargo, algunas prescripciones requieren precisiones adicionales que deben ser establecidas por el Pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto (PPTP) o bien por el Director de las obras.

Según establece el propio PG-3, lo indicado en el PPTP prevalece en cualquier caso sobre lo establecido en aquél. Por tanto, el PPTP no sólo debe en su caso precisar lo que no haya hecho el PG-3, sino que puede incorporar, modificar o suprimir prescripciones, a fin de adaptar las condiciones de ejecución de las obras a la realidad. Debe tenerse en cuenta a este respecto que el PG-3 tiene un ámbito territorial de aplicación muy extenso y variado, por lo que, en determinados lugares, resulta imprescindible adaptar las especificaciones generales al clima local, a los procedimientos constructivos habituales y a los materiales realmente disponibles sobre cuyo empleo existe una experiencia contrastada positiva.

En base a lo anterior, la Generalitat ha considerado conveniente redactar estas recomendaciones para la redacción de los PPTP, de manera que, sin alterar el espíritu ni la estructura del PG-3, se consiga la máxima adaptación a la realidad de la Comunitat Valenciana, sin merma, por supuesto, de la calidad finalmente conseguida. El PG-3 seguirá constituyendo la prescripción general de referencia, y en este sentido debe citarse expresamente en el pliego del proyecto. Adicionalmente, los párrafos correspondientes de estas recomendaciones deberán ser reproducidos íntegramente en el PPTP, añadiéndose además, si procede, las precisiones requeridas directamente por esos párrafos o por la redacción original del PG-3 en la medida en que no haya sido modificada.

#### **A.1.2 Características generales de los materiales para zahorras.**

El apartado 510.2.1 es sustituido por texto que se recoge a continuación:

*“Para cualquier categoría de tráfico pesado se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, en cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 1 de junio de 2001 por el que se*

*aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Asimismo, se tendrá en cuenta lo establecido en el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.”*

### A.1.3 Limpieza.

En relación con lo dispuesto en el apartado 510.2.3 se adopta la siguiente redacción:

*“El equivalente de arena, según la UNE-EN 933-8 (empleando la fracción 0/4 mm según se establece en su Anexo A), del material de la zahorra artificial deberá cumplir lo indicado en la tabla 510.1. De no cumplirse esta condición, su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9, deberá ser inferior a diez (10), y simultáneamente, el equivalente de arena no deberá ser inferior en más de cinco unidades a los valores indicados en la tabla 510.1.*

**Tabla 510.1 – Equivalente de arena (EA) de la zahorra artificial**

<i>Categoría de Tráfico Pesado</i>		
<i>T00 a T1</i>	<i>T21 a T42 Arcenes de T00 a T22</i>	<i>Arcenes de T31 a T42</i>
<i>EA &gt; 35</i>	<i>EA &gt; 30</i>	<i>EA &gt; 25</i>

*En el caso de la zahorra natural, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá disminuir en cinco (5) unidades cada uno de los valores mínimos exigidos en la tabla 510.1. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá establecer esa misma disminución de cinco (5) unidades en el valor mínimo del equivalente de arena en el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras), así como en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales.”*

### A.1.4 Resistencia a la fragmentación.

Se adopta la siguiente redacción en lugar de la recogida en el apartado 510.2.5:

*“El coeficiente de Los Ángeles, según la UNE-EN 1097-2, de los áridos para la zahorra artificial no deberá ser superior a los valores indicados en la tabla 510.2.*

*Para materiales reciclados procedentes de capas de mezcla bituminosa de firmes de carretera o de demoliciones de hormigones, así como para áridos siderúrgicos, el valor del coeficiente de Los Ángeles podrá ser superior en cinco (5) unidades a los valores que se*

exigen en la tabla 510.2, siempre y cuando su composición granulométrica esté adaptada al huso ZAD20, especificado en la tabla 510.3.1.

**Tabla 510.2 – Valor máximo del coeficiente de Los Ángeles para los áridos de la zahorra artificial**

<i>Categoría de Tráfico Pesado</i>	
<i>T00 a T1</i>	<i>T21 a T42 y Arcenes</i>
30	35

*En el caso de los áridos para la zahorra natural, el valor máximo del coeficiente de Los Ángeles será superior en cinco (5) unidades a los valores que se exigen en la tabla 510.2, cuando se trate de áridos naturales. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá establecer ese mismo aumento de cinco (5) unidades en el valor máximo del coeficiente de Los Ángeles en el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras), así como en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales.*

*Para materiales reciclados procedentes de capas de mezcla bituminosa de firmes de carretera o de demoliciones de hormigones y para áridos siderúrgicos a emplear como zahorras naturales el valor del coeficiente de Los Ángeles podrá ser superior hasta en diez (10) unidades a los valores que se exigen en la tabla 510.2.”*

#### A.1.5 Central de fabricación de la zahorra artificial.

El texto siguiente sustituye al que figura en el apartado 510.4.1:

*“La fabricación de la zahorra artificial para su empleo en firmes de calzadas de carreteras con categoría de tráfico pesado T00 a T1 se realizará en centrales de mezcla. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo y la producción horaria mínima de la central.*

*En cualquier caso, la instalación deberá permitir dosificar por separado las distintas fracciones de árido y el agua en las proporciones y con las tolerancias fijadas en la fórmula de trabajo. El número mínimo de fracciones para las zahorras artificiales será de dos (2).*

*Las tolvas para los áridos deberán tener paredes resistentes y estancas, bocas de anchura suficiente para que su alimentación se efectúe correctamente, provistas de una rejilla que permita limitar el tamaño máximo, así como de un rebosadero que evite que un exceso de contenido afecte al funcionamiento del sistema de clasificación. Se dispondrán con una separación suficiente para evitar contaminaciones entre ellas. Estas tolvas deberán, asimismo, estar provistas a su salida de dispositivos ajustables de dosificación.*



*Los sistemas de dosificación de los materiales podrán ser volumétricos; no obstante, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá establecer que sean en masa cuando la obra tenga una superficie de pavimentación superior a setenta mil metros cuadrados (70.000 m<sup>2</sup>).*

*Si se utilizan centrales de fabricación con dosificadores en masa, éstos deberán ser independientes; al menos uno (1) para cada una de las fracciones del árido. La precisión del dosificador será superior al dos por ciento ( $\pm 2\%$ ).*

*El agua añadida se controlará mediante un caudalímetro, cuya precisión sea superior al dos por ciento ( $\pm 2\%$ ), y un totalizador con indicador en la cabina de mando de la central.*

*Los equipos de mezcla deberán ser capaces de asegurar la completa homogeneización de los componentes dentro de las tolerancias fijadas.*

*Para la fabricación de las zahorras artificiales en vías con categorías de tráfico pesado T21 a T32, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá admitir la fabricación in situ. Ésta se realizará por medio de equipos específicos cuyas características deben ser definidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. En todo caso se debe garantizar con ellos una granulometría precisa y homogénea y un buen reparto del agua necesaria para la compactación. Estos equipos deben realizar las operaciones de dosificación, distribución del agua, mezcla y extensión en continuo, sin intervención manual. No deben presentar fugas, goteos ni obstrucciones, ni presentar desgastes o suciedad en sus elementos.*

*En las carreteras con categoría de tráfico pesado T41 y T42, en los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras) y en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales, la fabricación de las zahorras artificiales se llevará a cabo in situ.*

*El Director de las Obras aprobará el equipo de fabricación, una vez realizadas las pruebas de producción y comprobadas la correcta dosificación y homogeneización de la mezcla.”*

#### A.1.6 Equipos de extensión.

El apartado 510.4.3 queda reducido al siguiente párrafo:

*“En todos los casos el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá definir, o en su defecto el Director de las Obras deberá aprobar, los equipos de extensión de las zahorras.”*

#### A.1.7 Extensión de la zahorra.

En el apartado 510.5.4 la redacción queda de la siguiente manera:

*“Una vez aceptada la superficie de asiento se procederá a la extensión de la zahorra, en tongadas de espesor no superior a treinta centímetros (30 cm), tomando las precauciones necesarias para evitar segregaciones y contaminaciones. El Director de las Obras podrá aprobar la extensión de tongadas en espesores superiores al indicado si se comprueba que con los equipos de compactación disponibles se consiguen, tanto en la parte superior como en la inferior de la tongada, las densidades mínimas especificadas en el apartado 510.7.1.*

*Todas las operaciones de aportación de agua deberán tener lugar antes de iniciar la compactación. Después, la única admisible será la destinada a lograr, en superficie, la humedad necesaria para la ejecución de la tongada siguiente.”*

#### A.1.8 Densidad.

El apartado 510.7.1 queda con la siguiente redacción:

*Para las categorías de tráfico pesado T00 a T1, la compactación de la zahorra artificial deberá alcanzar una densidad no inferior a la que corresponda al cien por cien (100%) de la máxima de referencia, obtenida en el ensayo Proctor modificado, según la UNE 103501.*

*En el caso de la zahorra natural o cuando la zahorra artificial se vaya a emplear en calzadas de carreteras con categoría de tráfico pesado T21 a T42 o en arcenes, se podrá admitir una densidad no inferior al noventa y ocho por ciento (98%) de la máxima de referencia obtenida en el ensayo Proctor modificado, según la UNE 103501.*

*En el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras) y en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá admitir una densidad no inferior al noventa y cinco por ciento (95%) de la máxima de referencia obtenida en el ensayo Proctor modificado, según la UNE 103501.”*

#### A.1.9 Capacidad de soporte.

El apartado 510.7.2 queda con la siguiente redacción:

“El control de la capacidad de soporte de las capas de zahorra se basará en los resultados de ensayos de auscultación de la deflexión mediante un deflectómetro de impacto configurado para ejercer una carga de 49 kN sobre una placa de 30 cm de diámetro, o equivalente en términos de presión de contacto sobre la superficie.

A partir de las deflexiones registradas por el deflectómetro, se calculará el módulo elástico de superficie de la capa, que representa su rigidez equivalente, aplicando la siguiente expresión:

$$E_0 = \frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot r \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

donde  $E_0$  es el módulo elástico de superficie de la capa,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson considerado (se tomará un valor de 0,35),  $\sigma_0$  es la presión aplicada sobre la superficie, y  $d_0$  la deflexión registrada bajo el punto de aplicación de la carga.

Los valores de referencia mínimos de los módulos elásticos de superficie serán los especificados en la tabla 510.5A, según la categoría de tráfico pesado considerada.

Los valores de la tabla 510.5A se refieren al valor característico del módulo elástico de superficie  $E_{0,ck}$  obtenido como la media ( $m$ ) menos una vez la desviación típica ( $s$ ) de los resultados de al menos siete ensayos en el caso de longitudes a evaluar inferiores a 500 m, de diez ensayos para longitudes entre 500 y 1 000 m, o del número de ensayos que se obtenga como resultado de dividir entre 100 la longitud a evaluar cuando ésta sea superior a 1 000 m, es decir, realizando un ensayo cada 100 m.

Para poder llevar a cabo el control de capacidad de soporte de las capas de zahorra artificial por medio del deflectómetro de impacto, será preceptiva la ejecución de un impacto de asentamiento, y posterior a éste se deberán efectuar al menos dos impactos de 49 kN en cada punto de ensayo, tomando como valor representativo la media de las deflexiones obtenidas en cada uno de ellos, siempre que sus valores no difieran en más de un 5%; en caso contrario, no podrá considerarse el ensayo como válido.

Si no se dispusiese de un deflectómetro de impacto, el Director de las Obras podrá autorizar el control de la capacidad de soporte mediante el ensayo de carga con placa. En ese caso, el valor del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa ( $E_{\nu 2}$ ), según la NLT-357, será superior al menor valor de los siguientes:

- Los especificados en la tabla 510.5B, establecida según las categorías de tráfico pesado.
- Si la zahorra se apoya directamente sobre la explanada, el valor exigido a esta superficie multiplicado por uno coma tres (1,3).

**Tabla 510.5A – Valores de referencia mínimos del módulo elástico de superficie  $E_{0,ck}$  [MPa]**

Categoría de tráfico pesado				
T00 a T1	T21 i T22	T31 i T32	T41 i T42 Arcenes T21 i T22	Arcenes T31 a T42
375	345	290	215	175

**Tabla 510.5B – Valores mínimos del módulo  $E_{v2}$  [MPa]**

Categoría de tráfico pesado				
T00 a T1	T21 i T22	T31 i T32	T41 i T42 Arcenes T21 i T22	Arcenes T31 a T42
250	150	100	75	60

Además de lo anterior, el valor de la relación de módulos  $E_{v2}/E_{v1}$  será inferior a dos unidades (2,0), salvo que el Director de las Obras indicase otro valor.

Las mismas exigencias establecidas para los arcenes de carreteras con categorías de tráfico pesado T31 a T42 serán las que se apliquen en el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras) y en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales.”

#### A.1.10 Rasante, espesor y anchura.

Se modifica el contenido del apartado 510.7.3 a fin de cambiar el límite entre las categorías de tráfico pesado a las cuales se les exigen valores distintos, de manera que esta prescripción queda de la siguiente forma:

“Dispuestos los sistemas de comprobación aprobados por el Director de las Obras, la rasante de la superficie terminada no deberá superar a la teórica en ningún punto ni quedar por debajo de ella en más de quince milímetros (15 mm) en calzadas de carreteras

*con categoría de tráfico pesado T00 a T1, ni en más de veinte milímetros (20 mm) en el resto de los casos. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o el Director de las Obras podrán modificar los límites anteriores.*

*En todos los semiperfiles se comprobará la anchura de la capa extendida, que en ningún caso deberá ser inferior a la establecida en los Planos de secciones tipo. Asimismo el espesor de la capa no deberá ser inferior en ningún punto al previsto para ella en los Planos de secciones tipo; en caso contrario se procederá según el apartado 510.10.3.”*

#### **A.1.11 Criterios de aceptación o rechazo del lote. Regularidad superficial.**

En relación con el contenido del apartado 510.10.5, su redacción queda como sigue a continuación:

*“En el caso de la zahorra artificial, si los resultados de la regularidad superficial de la capa terminada exceden los límites establecidos, se procederá a escarificar la capa en una profundidad mínima de quince centímetros (15 cm) en toda la longitud afectada y se volverá a compactar y refinar por cuenta del Contratista.”*

#### **A.1.12 Especificaciones técnicas y distintivos de calidad.**

El último apartado del artículo 510 del PG-3 (el 510.12) debe adaptarse necesariamente al ámbito administrativo de la Generalitat, por lo que queda así:

*“El cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias requeridas a los productos contemplados en este artículo, se podrá acreditar por medio del correspondiente certificado que, cuando dichas especificaciones estén establecidas exclusivamente por referencia a normas, podrá estar constituido por un certificado de conformidad a dichas normas.*

*Si los referidos productos disponen de una marca, sello o distintivo de calidad que asegure el cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias de este artículo, se aceptará como tal cuando dicho distintivo esté reconocido por la Generalitat.*

*El certificado acreditativo del cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias de este artículo podrá ser otorgado por la Direcció General d’Obres Públiques de la Conselleria de Infraestructures i Transport de la Generalitat o por los organismos españoles públicos y privados autorizados para realizar tareas de certificación o ensayos en el ámbito de los materiales, sistemas y procesos industriales, conforme al Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre.”*

## A.2 Mezclas bituminosas en caliente.

### A.2.1 Introducción.

En el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento las especificaciones de las mezclas bituminosas en caliente están recogidas en los artículos 542 (Mezclas bituminosas en caliente) y 543 (Mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura). La redacción actual de ambos artículos fue aprobada por Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, publicada en el Boletín Oficial del Estado de 6 de abril de 2004. Sin embargo, la entrada en vigor el 1 de marzo de 2008 del mercado CE de las mezclas bituminosas en caliente, con carácter obligatorio, supone tener que definir estos materiales de acuerdo con las normas UNE-EN 13108 y caracterizarlos mediante los métodos de ensayo descritos en las normas UNE-EN 12697. En tanto en cuanto no se disponga de una guía de aplicación nacional en la que se fijen las opciones de ensayo a aplicar entre las que se recogen en las últimas normas citadas y se establezcan referencias de los correspondientes parámetros (dicho de otro modo: mientras no exista una nueva redacción de los dos citados artículos del PG-3 que no entre en contradicción con la nueva realidad derivada de la obligatoriedad del mercado CE) se estará en una situación transitoria que hay que intentar que se prolongue lo menos posible.

Por ello, la Generalitat ha considerado conveniente recoger en este Anejo a la Norma de Secciones de firme de la Comunitat Valenciana las precisiones indispensables para, al redactar los pliegos de prescripciones técnicas particulares de los proyectos, adaptarse a lo que impone el mercado CE de las mezclas bituminosas en caliente.

### A.2.2 Tipos de mezclas bituminosas en caliente.

Las Normas UNE-EN 13108 recogen los siguientes tipos de mezclas bituminosas en caliente:

- Hormigón bituminoso (*Asphalt Concrete, AC*).
- Hormigón bituminoso para capas de pequeño espesor (*Béton bitumineux très mince, BBTM*).
- *Soft Asphalt*.
- *Hot Rolled Asphalt, (HRA)*
- *Stone Mastic Asphalt, (SMA)*
- Mástico bituminoso (*Mastic Asphalt*).
- Mezcla porosa (*Porous Asphalt, PA*).

De todos estos tipos, solamente los hormigones bituminosos (AC), los hormigones bituminosos para capas de pequeño espesor (BBTM) y las mezclas porosas (PA) se utilizan de manera generalizada en España y están incluidos en las especificaciones del Ministerio

de Fomento; sin embargo, las mezclas del tipo SMA se emplean cada vez más, al menos en algunas regiones. Los AC incluyen las mezclas densas (D), semidensas (S) y gruesas (G), así como las mezclas de alto módulo (MAM), mientras que los BBTM incluyen tanto los microaglomerados del tipo M como los del tipo F.

La Norma UNE-EN 13108-8 se refiere a un octavo material no citado entre los anteriores: las mezclas recicladas. Pero dicha Norma no se refiere realmente a un tipo de mezcla, sino que en ella se considera el fresado como material constituyente del resto de mezclas bituminosas en caliente, especificando los requisitos para su clasificación y descripción.

### A.2.3 Denominaciones de las mezclas bituminosas en caliente.

Las mezclas del tipo AC se han de denominar de la siguiente forma:

*AC D surf/bin/base ligante granulometría*

donde:

- *D* es el tamaño máximo nominal del árido (16, 22 o 32 mm).
- *surf/bin/base* son los indicativos de las capas en las que puede ir situada la mezcla bituminosa (rodadura, intermedia o base).
- *ligante* es el tipo que se utilice según las normas europeas, sea betún asfáltico (norma EN 12591), betún asfáltico duro para mezclas de alto módulo (norma EN 13924) o betún modificado (norma EN 14023).
- *granulometría* es el tipo de huso empleado según la denominación tradicional española: D, S, G o MAM.

En cuanto a las mezclas del tipo BBTM su denominación responde al siguiente esquema:

*BBTM D clase ligante*

donde *D* (8 u 11 mm) y *ligante* se refieren a lo mismo que en el caso anterior y la *clase* puede ser una de las cuatro definidas en la norma UNE-EN 13108-2: A, B, C o D, correspondiendo la clase A a las mezclas españolas del tipo F y la clase B a las mezclas M.

Finalmente, la denominación de las mezclas porosas es:

*PA D ligante*

siendo el tamaño máximo nominal del árido de estas mezclas 11 o 16 mm.

Los tamaños máximos nominales citados no excluyen otros posibles que pueden resultar más convenientes en determinadas circunstancias. Por ejemplo, en capas de regularización se podrán utilizar, como ahora es habitual, mezclas del tipo AC con un tamaño máximo nominal de 11 mm o incluso de tan sólo 8 mm.

#### A.2.4 Empleo de las mezclas bituminosas en caliente.

En la Norma de Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana se han establecido las condiciones de utilización de los distintos tipos de mezclas bituminosas en caliente indicadas en la tabla A.1.

**Tabla A.1 – Espesores de las capas de mezcla bituminosa**

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado		
		T00 a T21	T22 y T31	T32 a T42
Rodadura	PA 11 <sup>(1)</sup>	4		
	BBTM 11 B M	3		
	BBTM 8 B M		2	
	BBTM 11 A F	3		
	BBTM 8 A F		2	
	AC 16 surf D		5 – 6	5
	AC 22 surf D			
	AC 16 surf S			
	AC 22 surf S			
Intermedia	AC 22 bin D	5 - 10		
	AC 22 bin S			
	AC 32 bin S			
	AC 22 bin G <sup>(2)</sup>			
	AC 32 bin G <sup>(2)</sup>			
	AC 22 bin 15/25 MAM	7 – 13		
Base	AC 32 base S	7 - 15		
	AC 22 base G			
	AC 32 base G			
	AC 22 base 15/25 MAM	7 - 13		

<sup>(1)</sup> Se podrán proyectar pavimentos con mezcla drenante PA, siempre que se justifique detalladamente su idoneidad para el caso concreto del que se trate. La justificación deberá tener en cuenta, entre otros factores, la inclinación longitudinal de la vía, la pluviometría de la zona, la intensidad total del tráfico y la necesidad de reducir el ruido en las márgenes de la carretera. En cualquier caso, la longitud pavimentada con este tipo de mezcla no será inferior a 500 m.



(2) Las mezclas tipo AC 22 bin G y AC 32 bin G únicamente podrán emplearse cuando la capa de rodadura sea tipo AC (es decir, nunca bajo rodaduras tipo PA o BBTM) y con una dotación mínima de ligante del 4,0 % en masa sobre el total del árido seco incluido el polvo mineral (3,85 % sobre la masa total de la mezcla).

### A.2.5 Husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente.

Las mezclas bituminosas en caliente del tipo AC (hormigones bituminosos) deberán tener granulometrías que se inscriban en los siguientes husos que se indican en la tabla A.2.a.

**Tabla A.2.a - Husos granulométricos de los hormigones bituminosos**

Tamices UNE-EN 933-2 (mm)	AC16D	AC22D	AC16S	AC22S	AC32S	AC22G	AC32G	AC22MAM
45					100		100	
32		100		100	90-100	100	90-100	100
22	100	90-100	100	90-100		90-100		90-100
16	90-100	73-88	90-100	70-88	68-82	65-86	58-76	70-88
8	64-74	55-70	60-75	50-66	50-66	40-60	35-54	50-66
4	44-59		35-50					
2	31-46	31-46	24-38	24-38	24-38	18-32	18-32	24-38
0,500	16-27	16-27	11-21	11-21	11-21	7-18	7-18	11-21
0,250	11-20	11-20	7-15	7-15	7-15	4-12	4-12	8-15
0,063	4-8	4-8	3-7	3-7	3-7	2-5	2-5	6-9

Las mezclas PA y BBTM tendrán las mismas granulometrías que las actuales mezclas PA, por un lado, y F y M por otro, definidas, respectivamente, en los hasta ahora vigentes artículos 542 y 543 del PG-3 (en la nueva redacción de estos artículos, ambos tipos de mezclas pasan a estar especificados en el artículo 543), adaptando los tamices de mayor tamaño a la nueva serie. En la tabla A.2.b se definen estos husos.

**Tabla A.2.b - Husos granulométricos de las mezclas para capas de rodadura de los tipos BBTM y PA.**

Tamices UNE-EN 933-2 (mm)	BBTM 8B *	BBTM 11B *	BBTM 8A *	BBTM 11A *	PA 11
16		100		100	100
11,2	100	90-100	100	90-100	90-100
8	90-100	60-80	90-100	62-82	50-70
5,6	42-62		50-70		
4	17-27	17-27	28-38	28-38	13-27
2	15-25	15-25	25-35	25-35	10-17
0,500	8-16	8-16	12-22	12-22	5-12
0,063	4-6	4-6	7-9	7-9	3-6

(\*) La fracción del árido que pasa por el tamiz de 4 mm y es retenida por el tamiz de 2 mm será inferior al ocho por ciento (8 %)

#### A.2.6 Dotaciones mínimas de ligante de las mezclas bituminosas en caliente.

Las dotaciones mínimas de betún se expresarán siempre sobre la masa total de la mezcla y serán las que se indican en la tabla A.3.

**Tabla A.3 – Dotaciones mínimas de betún (tanto por ciento sobre la masa total de la mezcla)**

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Dotación mínima (% s/m)
Rodadura	PA 11	4,30
	BBTM 11 B M	4,75
	BBTM 8 B M	4,75
	BBTM 11 A F	5,20
	BBTM 8 A F	5,20
	AC 16 surf D	4,55
	AC 22 surf D	4,55
	AC 16 surf S	4,55
Intermedia	AC 22 surf S	4,55
	AC 22 bin D	3,85
	AC 22 bin S	3,85
	AC 32 bin S	3,85
	AC 22 bin G	3,85
	AC 32 bin G	3,85
Base	AC 22 bin 15/25 MAM	5,00
	AC 32 base S	3,40
	AC 22 base G	3,40

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Dotación mínima (% s/m)
	AC 32 base G	3,40
	AC 22 base 15/25 MAM	5,00

#### A.2.7 Características exigibles al árido grueso.

Para los áridos gruesos empleados en la capa de rodadura se exigirá un coeficiente de pulimento acelerado mínimo determinado según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1097-8. Los valores a exigir serán los siguientes: mayor o igual a 56 para la categoría de tráfico pesado T00; mayor o igual a 50 para las categorías de tráfico pesado T0 a T22; mayor o igual a 44 para el resto de categorías de tráfico pesado y para arcenes.

#### A.2.8 Criterios básicos de caracterización de propiedades de las mezclas bituminosas en caliente.

Los hormigones bituminosos (AC) y los hormigones bituminosos para capas de pequeño espesor (BBTM) se caracterizarán en función de la proporción de huecos en mezcla, de la sensibilidad a la acción del agua y de la resistencia a las deformaciones plásticas. Por su parte, las mezclas porosas (PA) se caracterizarán en función de la proporción de huecos en mezcla y de la sensibilidad a la acción del agua.

En relación con los huecos en mezcla se exigirán los mismos valores recogidos en los artículos 542 o 543, según corresponda, del PG-3. Las probetas de los hormigones bituminosos del tipo AC16 y AC22 se compactarán por impactos mediante 75 golpes por cara según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-30; las probetas de las mezclas de los tipos BBTM y PA se compactarán según el mismo procedimiento, pero mediante 50 golpes por cara; finalmente, para las mezclas del tipo AC32 se seguirá el procedimiento de compactación por vibración descrito en la norma UNE-EN 12697-32, utilizando un tiempo de vibración de ciento veinte segundos (120 s).

Para valorar la sensibilidad al agua (norma UNE-EN 12697-12) se utilizará la resistencia conservada (relación porcentual entre la resistencia de probetas tras inmersión en agua –entre 68 y 72 h a 40 °C- y la de probetas que no han estado en agua) medida el ensayo de tracción indirecta a 15 °C (norma UNE-EN 12697-23). Las probetas se deberán fabricar en todos los casos, salvo para las mezclas del tipo AC32, mediante 50 golpes por cara según el procedimiento de compactación por impactos descrito en la norma UNE-EN 12697-30; para las mezclas del tipo AC32, se seguirá el procedimiento de compactación por

vibración descrito en la norma UNE-EN 12697-32, aplicando un tiempo de vibración de ochenta segundos (80 s). Las resistencias conservadas obtenidas habrán de superar en todo tipo de mezclas el ochenta por ciento (80 %).

La resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas de los tipos AC y BBTM se evaluará mediante el ensayo de pista de laboratorio descrito en la norma UNE-EN 12697-22; entre las opciones contempladas en esta norma se utilizarán el dispositivo pequeño, el procedimiento B en aire, una temperatura de 60 °C y la aplicación de carga durante diez mil (10.000) ciclos. Las probetas deberán haber sido compactadas según la norma UNE-EN 12697-33, con el dispositivo de rodillo de acero.

En las mezclas de alto módulo (AC 22 MAM) se verificará que el módulo dinámico a 20 °C, determinado según el anexo C de la norma UNE-EN 12697-26, es superior a 11.000 MPa.

Para las mezclas porosas (PA) se valorará el escurrimiento de ligante según la norma UNE-EN 12697-18. Además, para estas mezclas se mantienen las prescripciones actuales recogidas en el PG-3 sobre la limitación de pérdida de partículas a 25 °C, que se valorará según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-17.

## **B VALIDACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EXPLANADAS Y CAPAS GRANULARES.**

### **B.1 Introducción.**

La explanada, o más generalmente, su cimiento, tiene una importancia decisiva en el comportamiento del firme, que depende en gran medida de las características de los suelos sobre los que se apoya.

Por otro lado, una de las misiones de la sección de firme es la distribución de las cargas de tráfico a través de las diferentes capas que la componen, con el objetivo de que las tensiones que lleguen al soporte de la misma sean lo suficientemente reducidas como para que no se produzcan deformaciones permanentes que acabarían reflejándose en la rodadura. Por tanto, la calidad de los materiales del cimiento del firme, y de su puesta en obra, influyen de manera determinante no sólo en las características de los materiales que apoyan sobre él, sino también en los espesores definitivos de las capas.

En general, para un mismo nivel de solicitaciones de tráfico, una mayor capacidad portante del cimiento del firme supone que los espesores de las diferentes capas de la sección sean más reducidos respecto a los que sería necesario disponer sobre explanadas de inferior categoría. Por otra parte, si el firme se ha dimensionado suponiendo una determinada capacidad de soporte del cimiento, y por diversos motivos, no se haya podido alcanzar en obra la misma, la vida del firme se verá mermada significativamente.

También en las capas de base de zahorra artificial, con función eminentemente resistente, para lograr ésta, es imprescindible alcanzar una elevada compacidad tras la puesta en obra.

Por tanto, la evaluación cuantitativa de la capacidad de soporte del cimiento del firme, y del grado de compactación de las capas granulares, mediante la realización de ensayos, es imprescindible. Generalmente, el método empleado, y prescrito en las diferentes normativas de firmes, es el ensayo de carga con placa; estos ensayos, pese a ser de empleo prácticamente universal y presentar correlaciones empíricas con el comportamiento del cimiento, presentan el inconveniente de ser extremadamente lentos (lo que limita el número de ensayos realizables, sin interferencia con el progreso normal de la obra, y precisión de la caracterización espacial de la explanada), además de que no simulan la aplicación de las cargas reales del tráfico.

Con el fin de mitigar los inconvenientes que el ensayo de carga con placa presenta, con motivo de los trabajos de redacción de la Norma de Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana se han desarrollado ensayos de validación del deflectómetro de impacto para la caracterización de explanadas y capas granulares, y para la evaluación de su capacidad de

soporte. La metodología de trabajo, así como los resultados de dichos ensayos se exponen en este anejo.

## **B.2 El deflectómetro de impacto.**

El deflectómetro de impacto es un equipo con el que se puede evaluar la capacidad estructural de un firme, o la capacidad de soporte de una explanada o capa granular, de manera no destructiva.

El ensayo consiste en la aplicación de una carga al terreno (o firme), mediante un impulso generado por una masa que se deja caer desde una altura determinada sobre un sistema amortiguador, que, a su vez, la transmite hacia una placa circular que se apoya sobre la superficie ensayada. Su objetivo es simular el paso de un eje de un vehículo pesado cargado, para medir la respuesta del terreno ante la aplicación de dicha solicitación. Conociendo la carga aplicada, la respuesta del cimiento, y la naturaleza y estructura del mismo, pueden deducirse las tensiones y deformaciones en cada punto.

El vehículo portador o remolcador del equipo de ensayo se detiene en la sección a auscultar, y se sitúa la placa de apoyo sobre el punto deseado. La placa y los sensores de deflexiones se sitúan en la superficie del pavimento con la configuración especificada. La masa se eleva hasta la altura requerida según el nivel de carga a aplicar. Cuando la masa cae, la fuerza es distribuida por la placa sobre la superficie del firme; en ese momento, se registra el movimiento vertical (deflexión) de dicha superficie bajo los sensores, mediante la instrumentación y equipos electrónicos e informáticos adecuados. Generalmente, en un mismo punto se realizan varios ensayos aplicando diferentes niveles de carga, modificando la altura de caída de la masa.

Para el desarrollo de los trabajos se contó con un deflectómetro de impacto modelo *KUAB-FWD 50*, configurado para generar cargas nominales de 49 kN (5.000 kg) y 64 kN (6.500 kg), obtenidas al dejar caer una doble masa desde una altura determinada sobre una placa circular de 150 mm de radio; esto equivale a aplicar una presión de contacto sobre el firme de 0,694 y 0,902 MPa, respectivamente. El equipo registra la deflexión (deformación vertical de la superficie del firme) bajo el punto de aplicación de la carga y en otros seis puntos situados a una distancia radial del mismo de 20, 30, 45, 60, 90 y 120 cm respectivamente, mediante unos sensores tipo LVDT, lo que permite obtener el denominado cuenco de deflexión o línea de influencia de la deformada.

## **B.3 La caracterización mediante deflectómetro de impacto.**

Uno de los problemas del ensayo de carga con placa es la lentitud del mismo; en condiciones óptimas, el rendimiento aproximado de un equipo es de aproximadamente 8 ensayos en una jornada. Lo que significa que, ensayando un punto cada kilómetro, en una

jornada se habrán ensayado unos 8 km de explanada. Para caracterizar la explanada con precisión, un punto en un kilómetro es estadísticamente insuficiente, por lo que sería deseable aumentar la frecuencia espacial de muestreo, digamos, hasta los 10 ensayos cada kilómetro (un punto cada 100 m). De esta forma, el equipo de carga con placa auscultaría una distancia inferior al kilómetro cada jornada de trabajo.

El deflectómetro de impacto permite rendimientos mucho mayores, del orden de 30 puntos de ensayo por hora; es decir, aproximadamente, ensayando cada 100 m para una caracterización representativa de la explanada, unos 24 km en una jornada de trabajo en condiciones normales. Con operadores suficientemente experimentados, estos rendimientos pueden ser fácilmente superiores.

Como ya se ha indicado anteriormente en este documento, el deflectómetro de impacto, mediante la aplicación de una carga de magnitud definida, registra la deflexión obtenida bajo el punto de aplicación de la carga y en otros seis puntos situados a una distancia radial del mismo de 20, 30, 45, 60, 90 y 120 cm respectivamente.

La carga aplicada, gracias a la configuración de la placa que transmite el impacto al terreno, es asimilable a una carga flexible circular, de radio  $a$  y presión uniforme  $q$ . Suponiendo que la carga se aplica sobre un semiespacio indefinido de módulo de elasticidad  $E$  y coeficiente de *Poisson*  $\nu$ , la deflexión en la superficie, bajo el punto de aplicación de la carga, será (ecuación de Boussinesq):

$$d_0 = \frac{2 \cdot q \cdot a \cdot (1 - \nu^2)}{E} \rightarrow E = \frac{2 \cdot q \cdot a \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

En general, puede suponerse un coeficiente de *Poisson* de 0,35 para el macizo semiindefinido, por lo que para cada impacto del deflectómetro, el resto de las variables serán conocidas, pudiendo determinar el módulo  $E$  del mismo.

Si se realizan ensayos con deflectómetro cada 100 m (o incluso cada 50 m si el proceso normal de la obra lo permite), es posible establecer para cada kilómetro un módulo de elasticidad medio ( $E_m$ ) y la desviación típica del mismo ( $E_s$ ), de forma que se puede adoptar un módulo característico ( $E_{ck}$ ), estadísticamente representativo, de la siguiente forma:

$$E_{ck} = E_m - E_s$$

El objetivo del trabajo de validación abordado en la Norma de Firmes de la Comunitat Valenciana es establecer, a la vista de los resultados obtenidos en el mismo, los valores de referencia exigidos, bien de módulos de elasticidad, bien de deflexión tanto para capas granulares como para explanadas en las obras de carreteras.

#### **B.4 Consideraciones adicionales para la caracterización de capas granulares con deflectómetro de impacto.**

Respecto a los ensayos habituales sobre firmes flexibles, con el objetivo de definir la mejor solución de rehabilitación estructural, se considera necesario señalar las siguientes consideraciones cuando el ensayo se realiza sobre capas granulares:

- Es imprescindible efectuar un impacto previo, denominado de asentamiento, antes de los impactos de ensayo. Si bien este impacto es importante también en los ensayos sobre pavimentos bituminosos, en capas granulares o explanadas, habitualmente menos uniformes en su superficie, es decisivo, de forma que en los impactos sucesivos al de asentamiento se pueden registrar valores de la deflexión bajo punto de aplicación de la carga del orden de un 35 % inferior a la registrada en el inicial (en pavimentos de mezcla bituminosa, las diferencias suponen apenas el 5 %).
- Es habitual registrar comportamientos erráticos en los sensores más alejados del punto de aplicación de la carga. Evidentemente, no podemos esperar que un medio granular, constituido por partículas discretas, se comporte exactamente como un continuo ideal de la mecánica clásica.
- En las explanadas más débiles, de categorías más bajas, es posible que se registren deflexiones demasiado altas; en ese caso, se debería reducir la carga aplicada.
- Aunque se realicen las suposiciones habituales, que consideran el medio como un macizo semiindefinido elástico, homogéneo, e isótropo, la realidad es que las deflexiones en materiales granulares y explanadas dependen de otros parámetros como son el grado de compactación, el contenido de humedad, el ángulo de rozamiento interno de los materiales, la cohesión de los mismos, etc. Por tanto, estos parámetros deben ser considerados a la hora de establecer los módulos elásticos de referencia.

#### **B.5 Organización del trabajo.**

Como se ha comentado previamente, el principal objeto del proceso es obtener la validación de los deflectómetros de impacto como sistema de control alternativo a la realización de ensayos de carga con placa.

Aunque el uso más convencional del deflectómetro es el análisis sobre capas de rodadura tanto asfálticas como de hormigón ya existentes, las particularidades del equipo *KUAB* y las de cualquier tipo de deflectómetro de impacto hacen que sea totalmente factible realizar mediciones directamente sobre capas granulares o de tierra, ya que en sus orígenes



en Suecia fue utilizado con esta función. Dichas particularidades son: un plato flexible, segmentado en cuatro secciones, cada una de las cuales recibe un cuarto de la carga, lo que en definitiva permite acomodarse a las irregularidades del terreno y repartir uniformemente la carga; la otra, es que los sensores que miden la deformación son sismómetros (LVDT) que permiten leer deflexiones de hasta 5 mm.

En este trabajo, los ensayos se realizaron sobre superficies terminadas (compactadas y refinadas) de explanada, de zahorra artificial y explanadas estabilizadas con cemento. Las campañas de ensayos se han llevado a cabo en carreteras pertenecientes a la Generalitat, Diputaciones de Castellón, Valencia y Alicante y Ministerio de Fomento, que se encontraban en fase de ejecución en las fechas en las cuáles se desarrollaron los ensayos.

Las campañas de ensayos se llevaron a cabo desde el 25 de junio de 2007 hasta el 8 de diciembre de 2007, a lo largo de las tres provincias de la Comunitat Valenciana.

Se han desarrollado ensayos en un total de 16 carreteras, de las cuales algunas han sido ensayadas por duplicado, tanto a nivel de explanada, como posteriormente sobre capa granular. Este doble nivel de ensayos habría sido un objetivo deseable en todas en ellas, pero la naturaleza de la obra, sus dificultades intrínsecas y los ritmos de trabajo de las mismas han hecho que no siempre haya sido posible su consecución.

Uno de los retos más complejos en el desarrollo de la presente investigación desde el punto de vista logístico fue la planificación de los ensayos en cada una de las obras y la coordinación de los equipos (deflectómetro y placa de carga), con los ritmos de trabajo de las mismas, que en la mayor parte de ocasiones sufrieron retrasos conforme a las fechas previstas por factores de diversa índole, como las adversas condiciones atmosféricas, lo que obligó a un reajuste continuo del calendario de trabajos.

Respecto a las condiciones de desarrollo de los ensayos de campo, éstos se han realizado siempre en el mismo día y lugar para ambos tipos de control (deflectometría y carga con placa).

Para el ensayo de carga con placa se utilizó la placa de 30 cm de diámetro, realizando su ensayo de acuerdo a la norma NLT 357/98. En el caso del deflectómetro, la secuencia de actuación en cada punto analizado fue la siguiente: un primer ensayo de asentamiento, y posterior a éste, se llevan a cabo ensayos con dos cargas de 49 y de 64 kN, respectivamente.

Cada día de trabajo se anotaron los siguientes datos, con la finalidad de obtener una mejor caracterización del tramo de estudio:

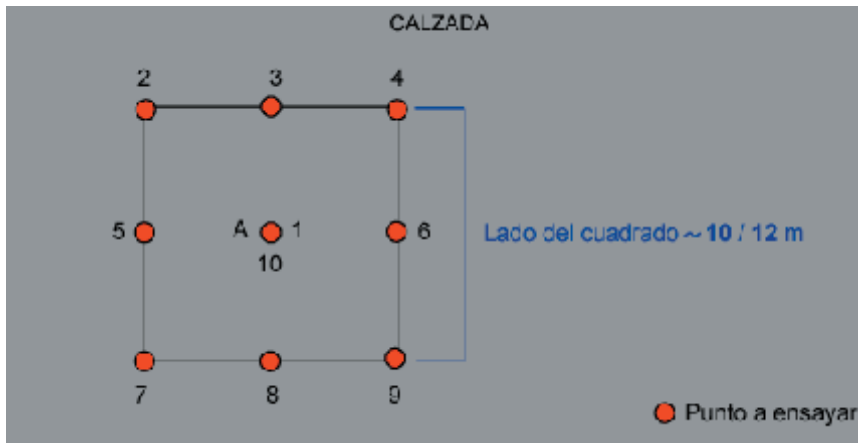
- Nombre de la obra e identificación de la carretera.
- Tipo de superficie ensayada: explanada, explanada estabilizada o zahorra.

- Datos sobre el material subyacente, recabándose toda la información posible al respecto, de modo que permita una buena caracterización del mismo.
- Fecha (día, mes y año).
- Hora de inicio y de finalización.
- Condiciones meteorológicas. Descripción cualitativa y cuantitativa (siempre que ha sido posible) de las condiciones meteorológicas previas al día del ensayo, así como la temperatura ambiente en el momento de realizar el ensayo correspondiente.
- Nombre y tarea de las personas que participan con especial atención a:
  - Operador responsable del deflectómetro de impacto.
  - Operador responsable de la placa de carga.
  - Referencia física de los lugares de ensayo: si está en desmonte o en terraplén, orografía de la zona, cultivos en las zonas colindantes, etc.)
  - P.K. de obra u otra referencia válida.
  - Coordenadas GPS de cada punto de ensayo.
  - Reportaje fotográfico con cámara digital de cada zona de ensayo.

Además se realizó un reportaje fotográfico completo de cada uno de los tramos analizados incluyendo imágenes de los equipos e imágenes de los ensayos conformando un reportaje global de toda la campaña.

Antes de la realización del ensayo de carga con placa se recabaron datos del camión utilizado para el mismo:

- Tipo de camión (marca y modelo).
  - Verificación mediante báscula contrastada de la carga del eje y de la presión de los neumáticos.
  - Matrícula y nombre del propietario o conductor.
  - La metodología empleada para las campañas simultáneas de deflectómetro y placa de carga fue la siguiente:
1. Se selecciona el punto de ensayo de carga con placa de acuerdo a los criterios de la norma NLT 357/98; la selección de los puntos a ensayar es tomada por el técnico responsable de la carga con placa y en función de los condicionantes particulares de la obra en cuestión.
  2. Sobre la zona del punto seleccionado se marca físicamente un cuadrado de aproximadamente 10/12 m de lado.
  3. Se organiza la realización de los ensayos con deflectómetro de impacto de acuerdo con el siguiente croquis y procedimiento:



- En el punto (1) primer ensayo con defleómetro de impacto.
- Después, en el punto (A) ensayo con placa de carga.
- Los puntos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, ensayo con defleómetro de impacto.
- En el punto (10) último ensayo de nuevo con defleómetro de impacto.

El primer punto de ensayo del defleómetro se encuentra aproximadamente en el centro de la retícula y es el punto donde inmediatamente después se va a realizar el ensayo de carga con placa. El ensayo de carga con placa es un proceso caro, lento y engorroso, que prácticamente necesita 1 h por punto ensayado. Mientras éste se está llevando a cabo en el centro del cuadrado, el defleómetro realiza 8 ensayos más en los puntos ubicados en las esquinas y centros de los lados del cuadrado (ver croquis). Una vez terminado el ensayo de placa se volverá a ensayar el punto central con defleómetro para poder contrastar el efecto que ejerce la placa sobre el terreno.

Por tanto, siempre que las dimensiones de la plataforma a analizar lo han permitido, por cada ensayo de carga con placa se han realizado 10 ensayos con defleómetro de impacto atendiendo a la metodología previamente explicada. En algunas ocasiones, donde el ancho de la carretera a ensayar no permitía maniobrar a los equipos de auscultación, se han reducido las dimensiones de la malla o sido necesario analizar los puntos en línea, con lo que el número de puntos ensayados con el defleómetro puede haber disminuido ligeramente.

Para definir la equidistancia entre los puntos a ensayar, con la finalidad de obtener una mejor caracterización de los suelos y capas granulares analizadas, disminuyendo el riesgo de defectos ocultos, se utilizó el siguiente criterio en función de la longitud de los tramos:

- En tramos cuya longitud sea inferior a 3.000 m, los ensayos se realizaron cada 50 m. Este valor es orientativo y pudo haber variado en función de las condiciones in situ y de las limitaciones del tramo en sí.

- En tramos de longitud mayor o igual a 3.000 m, los ensayos presentaron una equidistancia de 150 m, pudiendo variar ligeramente bajo el criterio del técnico responsable atendiendo a los condicionantes propios del tramo.

En la tabla B.1 se puede observar la gran cantidad de puntos de ensayo a lo largo de toda la campaña así como en número de análisis llevados a cabo por el deflectómetro en los diferentes tipos de material:

**Tabla B.1 - Relación de carreteras ensayadas**

Carretera	Titularidad	Puntos de ensayo	Nº Ensayos	Tipo de material
Nº1	Fomento	29	164	Suelo estabilizado
Nº2	Fomento	6	23	Suelo estabilizado
Nº3	Fomento	25	133	Suelo estabilizado
Nº4	Fomento	5	20	Suelo estabilizado
Nº5	Fomento	6	48	Suelo estabilizado
Nº6	Consellería	15	77	Suelo seleccionado
Nº7	Consellería	5	26	Suelo seleccionado
Nº8	Diputación	47	378	Suelo seleccionado
Nº9	Consellería	15	148	Suelo seleccionado
Nº10	Diputación	16	75	Suelo seleccionado
Nº11	Consellería	42	233	Suelo seleccionado
Nº12	Consellería	5	20	Zahorra artificial
Nº13	Diputación	46	459	Zahorra artificial
Nº14	Diputación	69	477	Zahorra artificial
Nº15	Consellería	26	127	Zahorra artificial
Nº16	Fomento	62	232	Zahorra artificial
<b>Total</b>		<b>419</b>	<b>2.640</b>	

De todos los ensayos realizados se han guardado los datos brutos, incluidas todas las lecturas de los comparadores de la placa de carga. Todos ellos forman parte de un sistema de archivo en el cuál han sido sometidos a una fase de depuración para su posterior tratamiento analítico y estadístico.

## **B.6 Resultados obtenidos.**

En las páginas siguientes se resumen los resultados obtenidos en la campaña de ensayos realizada conjuntamente con placa de carga y deflectómetro de impacto.

En primer lugar, se estudian los valores registrados por el deflectómetro de impacto. A este respecto, en la tabla B.2 se recogen los valores medios de los ensayos por tipo de capa.

**Tabla B.2 - Resultados obtenidos por tipo de material (valores medios)**

Tipo de material	Nº de ensayos	Carga media [kN]	Módulo medio [MPa]	Deflexión media [µm]
Suelo estabilizado	388	52,0	733	284
Suelo seleccionado	937	52,2	269	692
Zahorra artificial	1.315	52,4	377	528

Con independencia de la interpretación del valor absoluto de los módulos y las deflexiones obtenidas, se puede comprobar la sensibilidad del equipo a los diferentes tipos de materiales ensayados. El equipo detecta perfectamente la diferencia de capacidad portante del suelo seleccionado respecto a la del suelo estabilizado.

Un segundo nivel de análisis es el estudio de la correlación entre los ensayos de carga con placa y los ensayos con deflectómetro de impacto.

A este respecto se han elaborado las tablas y los gráficos de correlación  $E_{v2} - E_o$  entre los diversos parámetros obtenidos en cada tipo de ensayo, trabajando siempre con valores medios. Dichas tablas pueden consultarse en el anexo del presente documento.

## **B.7 Comparación entre diferentes tipos de deflectómetro.**

Los ensayos de deflexión llevados a cabo por *AEPO S.A Ingenieros Consultores* en las diferentes carreteras de la Comunitat Valenciana que forman parte del presente anejo fueron realizados con un deflectómetro de impacto modelo *KUAB-FWD 50*, cuyas características ya han sido detalladas en el apartado B.2.

Para comprobar que los resultados obtenidos son igualmente válidos, independientemente del modelo o marca de deflectómetro utilizado, siempre que el aparato esté calibrado correctamente, se realizaron varios tramos de comparación en los cuáles se midieron simultáneamente las deflexiones con el mencionado *KUAB* así como con otro deflectómetro de diferente marca y modelo.

Los gráficos que se adjuntan en el anexo muestran que no existen diferencias significativas entre las deflexiones registradas por los diferentes tipos de equipos, así como tampoco en los módulos obtenidos.

Por tanto, resulta válido para la caracterización de capas granulares todo tipo de deflectómetro que esté bien calibrado con independencia de su marca o modelo.

## B.8 Resumen y conclusiones.

El amplio trabajo realizado de validación del deflectómetro como instrumento apto para la caracterización tanto de capas granulares como de explanadas es uno de los objetivos que se han incluido en la redacción de la Norma de Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana.

Establecida la correlación entre el deflectómetro de impacto y la placa de carga, se fijaron, a la vista de los resultados obtenidos, los valores de referencia exigidos, bien de módulos de elasticidad, bien de deflexión tanto para capas granulares como para explanadas en las obras de carreteras.

Se estudió una correlación por cada tipo de material ensayado, obteniéndose los resultados que se pueden observar en los gráficos adjuntos, para finalmente hallar una correlación global que recoja todos los tipos de suelos analizados. A partir de dicha correlación, que presenta un ajuste de 92 %, y conociendo los valores la deflexión  $d_0$  registrada por el deflectómetro, se calculó  $E_0$  (módulo elástico de la superficie del terreno) en base a los cuales se definen las siguientes categorías de explanada:

- E1:  $E_{0,ck} \geq 100$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E2:  $E_{0,ck} \geq 140$  MPa;  $\nu = 0,40$
- E3:  $E_{0,ck} \geq 255$  MPa;  $\nu = 0,35$
- E4:  $E_{0,ck} \geq 440$  MPa;  $\nu = 0,30$

Para poder establecer la categoría de la explanada por medio del deflectómetro de impacto, será preceptiva la ejecución de un impacto de asentamiento, y posterior a éste se deberán efectuar al menos dos impactos de 49 kN en cada punto de ensayo, tomando como valor representativo la media de las deflexiones obtenidas en cada uno de ellos, siempre que sus valores no difieran en más de un 5%; en caso contrario, no podrá considerarse el ensayo como válido.

En caso de no disponerse de deflectómetro de impacto, se podrán emplear los módulos de compresibilidad obtenidos en el segundo ciclo de carga de ensayos de carga con placa definidos en la norma NLT-357, con los siguientes valores de referencia:

- E1:  $E_{v2} \geq 50$  MPa.
- E2:  $E_{v2} \geq 100$  MPa.
- E3:  $E_{v2} \geq 225$  MPa.
- E4:  $E_{v2} \geq 425$  MPa.

Dado que el número de deflectómetros de impacto es ya importante en España y que los programas de cálculo inverso son asequibles y de fácil manejo, este sistema de control debe tener un gran futuro en nuestro país ya que son múltiples las ventajas que presenta:

- Es un instrumento técnicamente útil y fiable para el control de la capacidad portante de la explanada y de las capas granulares.
- Es muy rápido, por lo que permite ensayar un número de puntos relativamente alto, favoreciendo una mejor caracterización de la capa a ensayar, con lo que se disminuye el riesgo de defectos ocultos.
- Se puede obtener directamente el parámetro buscado, en este caso el módulo de elasticidad de las capas.
- Es mucho más económico que la placa de carga.
- Las cargas aplicadas son dinámicas, como las producidas por el tráfico, y de una magnitud similar a éstas.

## B.9 Documentos anexos.

### B.9.1 Resultados en suelo seleccionado.

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
281,0	450,0	912,3	461,8	1,60
225,0	375,0	702,0	349,5	1,67
166,6	346,2	717,0	338,8	2,08
236,8	346,1	757,9	315,0	1,46
237,0	346,0	723,4	368,8	1,46
225,0	346,0	694,8	306,8	1,54
167,0	346,0	611,7	359,5	2,07
180,0	321,4	625,0	293,0	1,79
150,0	321,4	496,5	266,4	2,14
145,2	321,4	557,0	241,8	2,21
180,0	321,0	751,3	353,8	1,78
155,0	321,0	502,0	351,8	2,07
150,0	321,0	580,7	295,7	2,14
195,6	300,0	822,3	243,3	1,53
155,0	300,0	563,7	305,3	1,94
136,0	300,0	500,0	335,3	2,21
136,3	281,3	511,0	311,3	2,06
204,5	281,3	754,4	305,2	1,38
204,5	281,2	685,8	291,0	1,38
166,6	281,2	715,5	272,5	1,69
225,0	281,0	781,0	356,1	1,25
214,0	265,0	1 052,3	280,2	1,24
180,0	265,0	761,2	307,3	1,47
187,5	264,7	817,5	278,5	1,41
166,6	264,7	632,8	253,7	1,59
160,7	264,7	803,0	338,0	1,65
150,0	264,7	636,6	239,5	1,76
145,1	264,7	671,3	256,3	1,82
132,4	264,7	576,8	298,8	2,00
180,0	250,0	812,7	265,3	1,39
173,1	250,0	663,3	289,2	1,44
155,2	250,0	939,5	234,7	1,61
155,0	250,0	656,3	226,5	1,61
141,0	250,0	809,5	346,8	1,77
140,6	250,0	512,5	237,0	1,78
132,0	250,0	497,0	233,3	1,89
132,0	250,0	567,8	280,3	1,89



$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
180,0	237,0	893,8	272,9	1,32
173,0	237,0	951,5	291,4	1,37
187,5	236,8	1088,8	205,7	1,26
180,0	236,8	957,0	303,3	1,32
145,1	236,8	1 368,0	212,8	1,63
132,3	236,8	576,2	272,0	1,79
140,6	225,0	622,0	244,0	1,60
136,0	225,0	776,8	281,1	1,65
128,6	225,0	619,0	244,1	1,75
128,6	225,0	872,6	279,0	1,75
125,0	225,0	630,3	306,5	1,80
104,7	225,0	602,2	233,3	2,15
145,2	214,3	657,0	120,0	1,48
136,4	214,3	636,5	221,5	1,57
136,3	214,3	775,1	210,5	1,57
115,0	214,0	657,5	270,3	1,86
122,0	205,0	697,8	275,3	1,68
107,0	205,0	575,0	190,7	1,92
100,0	205,0	707,5	184,0	2,05
112,5	204,6	697,8	191,0	1,82
132,3	204,5	770,7	221,4	1,55
132,3	204,5	760,0	217,4	1,55
121,6	204,5	627,4	265,3	1,68
107,1	204,5	675,0	218,5	1,91
97,8	204,5	634,6	267,8	2,09
115,0	196,0	817,1	186,0	1,70
112,5	195,7	595,3	205,1	1,74
102,3	195,7	512,2	258,8	1,91
132,3	187,5	1 011,0	238,8	1,42
107,1	187,5	640,2	193,0	1,75
102,0	187,5	719,3	260,5	1,84
97,8	187,5	609,8	247,0	1,92
136,0	180,0	842,4	233,4	1,32
125,0	180,0	800,5	235,6	1,44
121,6	180,0	724,3	250,8	1,48
112,5	180,0	931,5	254,9	1,60
112,5	173,1	928,8	179,5	1,54
85,0	173,0	510,5	176,5	2,04
100,0	167,0	642,1	218,3	1,67
98,0	167,0	836,5	171,3	1,70
132,4	166,6	803,5	258,8	1,26

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
128,6	166,6	971,3	207,1	1,30
121,6	166,6	917,0	193,8	1,37
115,3	166,6	667,8	226,1	1,44
100,0	166,6	569,5	184,5	1,67
86,0	161,0	614,3	208,8	1,87
112,5	160,7	1 014,5	174,3	1,43
112,5	160,7	932,8	186,5	1,43
104,7	155,2	732,9	159,3	1,48
104,7	155,2	938,8	179,5	1,48
98,0	150,0	581,0	168,8	1,53
112,5	140,6	1028,0	217,3	1,25
76,0	136,0	711,4	164,3	1,79
56,3	107,1	585,8	153,0	1,90
47,4	93,7	540,0	97,3	1,98

#### B.9.2 Resultados en zahorra artificial.

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
450,0	750,0	818,5	726,0	1,67
375,0	750,0	693,8	644,7	2,00
321,4	642,8	563,3	637,0	2,00
281,2	562,5	416,5	677,0	2,00
300,0	500,0	485,3	460,3	1,67
265,0	500,0	437,0	490,8	1,89
236,8	500,0	522,4	445,3	2,11
236,8	450,0	553,9	398,0	1,90
236,8	450,0	584,4	406,4	1,90
204,5	450,0	481,3	410,3	2,20
225,0	409,1	608,6	351,8	1,82
204,5	409,1	706,1	342,5	2,00
195,6	409,1	457,2	442,8	2,09
225,0	409,0	485,9	355,6	1,82
250,0	375,0	633,0	368,8	1,50
214,3	375,0	527,8	337,0	1,75
187,5	375,0	501,4	346,5	2,00
187,5	375,0	406,8	410,1	2,00
180,0	375,0	491,7	369,2	2,08
180,0	375,0	499,5	371,8	2,08
180,0	375,0	544,3	382,3	2,08

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
173,1	375,0	654,5	369,3	2,17
264,7	346,1	555,7	378,7	1,31
250,0	346,1	484,8	311,3	1,38
214,3	346,1	472,0	387,1	1,62
195,7	346,1	490,3	369,8	1,77
195,6	346,1	403,6	342,8	1,77
173,0	346,1	463,6	347,5	2,00
166,6	346,1	524,3	429,0	2,08
160,7	346,1	527,0	335,4	2,15
237,0	346,0	385,5	347,0	1,46
214,0	346,0	396,8	359,7	1,62
214,0	346,0	437,5	384,0	1,62
187,5	346,0	518,0	417,0	1,85
214,2	321,4	483,8	290,6	1,50
204,5	321,4	546,0	348,2	1,57
204,5	321,4	473,3	375,7	1,57
195,6	321,4	800,0	333,5	1,64
195,6	321,4	551,3	342,3	1,64
187,5	321,4	593,8	333,9	1,71
187,5	321,4	565,8	366,4	1,71
180,0	321,4	564,8	416,3	1,79
173,1	321,4	1 122,5	362,0	1,86
150,0	321,4	512,8	364,2	2,14
196,0	321,0	464,1	292,5	1,64
180,0	321,0	513,5	347,2	1,78
150,0	321,0	425,2	365,5	2,14
205,0	300,0	853,5	357,8	1,46
195,6	300,0	494,1	386,0	1,53
173,1	300,0	504,1	298,4	1,73
173,1	300,0	480,8	340,0	1,73
167,0	300,0	365,5	306,0	1,80
166,7	300,0	463,0	347,8	1,80
160,7	300,0	478,5	312,3	1,87
155,2	300,0	634,8	309,1	1,93
155,2	300,0	514,5	374,8	1,93
150,0	300,0	624,4	294,0	2,00
150,0	300,0	483,5	353,8	2,00
145,1	300,0	506,6	344,5	2,07
204,5	281,2	459,3	367,2	1,38
166,6	281,2	431,5	320,0	1,62
173,0	281,2	426,6	258,4	1,63

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
160,7	281,2	462,6	363,1	1,75
155,2	281,2	516,0	317,8	1,81
187,5	281,0	560,6	312,5	1,50
167,0	265,0	638,8	291,3	1,59
136,3	264,7	583,0	298,5	1,94
155,1	250,0	464,6	326,6	1,61
150,0	250,0	434,3	304,3	1,67
145,2	250,0	465,6	242,5	1,72
121,6	250,0	454,8	280,8	2,06
121,6	236,8	589,1	217,3	1,95
125,0	225,0	745,8	263,3	1,80
112,5	225,0	506,5	308,8	2,00
136,3	214,2	568,3	282,8	1,57
125,0	214,2	525,9	271,7	1,71
129,0	205,0	205,0	200,3	1,59
112,5	204,5	231,5	233,8	1,82
100,0	195,7	265,5	216,3	1,96
121,6	187,5	262,7	249,3	1,54
86,5	173,0	249,0	205,0	2,00
77,6	155,2	379,7	153,0	2,00

### B.9.3 Resultados en suelo estabilizado.

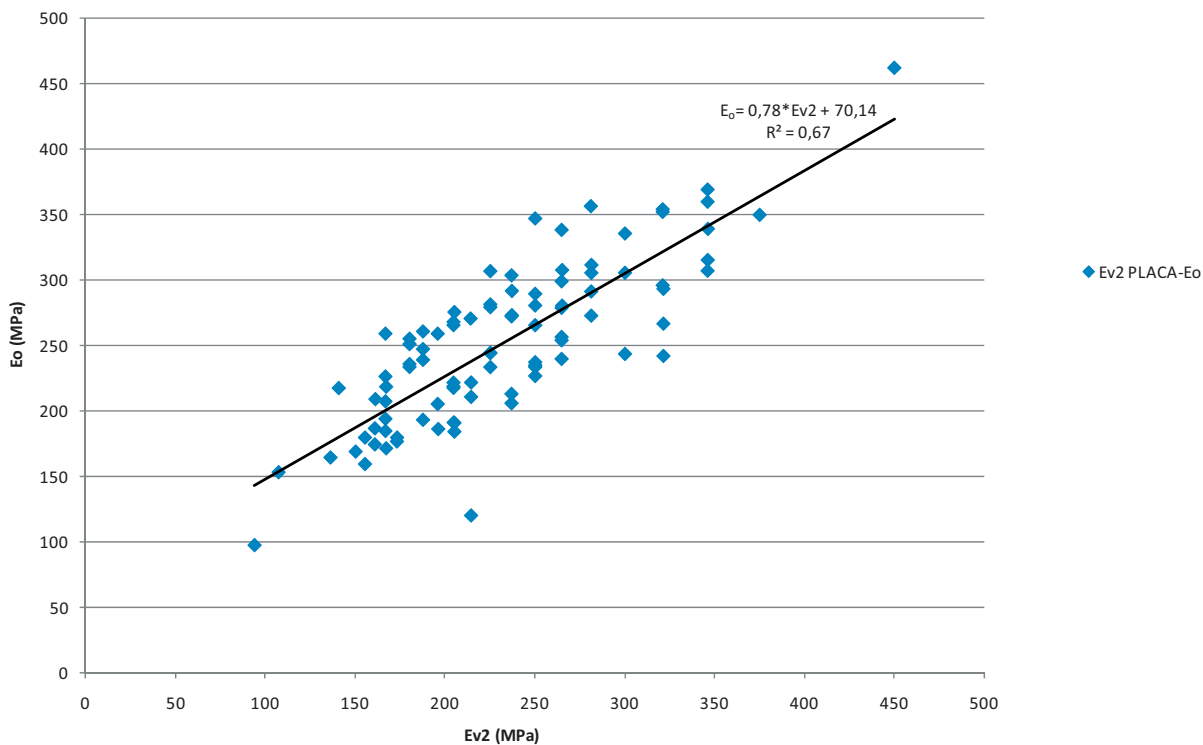
$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
1 125,0	1 500,0	113,0	1512,3	1,33
750,0	1 500,0	141,8	1214,3	2,00
900,0	1 125,0	186,0	969,5	1,25
900,0	1 125,0	173,3	997,8	1,25
750,0	1 125,0	184,5	929,3	1,50
643,0	1 125,0	186,3	928,1	1,75
642,9	900,0	224,9	787,2	1,40
563,0	900,0	216,5	775,5	1,60
450,0	900,0	238,0	884,8	2,00
409,1	900,0	161,0	1062,8	2,20
562,5	750,0	198,8	852,3	1,33
562,5	750,0	207,1	821,5	1,33
500,0	750,0	204,3	831,5	1,50
500,0	750,0	231,7	773,1	1,50
450,0	750,0	198,8	922,8	1,67
450,0	750,0	183,0	942,0	1,67

$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	Deflexión [ $\mu\text{m}$ ]	$E_0$ [MPa]	k
450,0	750,0	233,0	727,3	1,67
409,1	750,0	213,1	832,9	1,83
346,1	750,0	270,0	626,8	2,17
346,1	750,0	208,5	822,5	2,17
500,0	643,0	332,0	547,4	1,29
375,0	643,0	194,3	891,6	1,71
346,0	643,0	271,2	636,9	1,86
500,0	642,9	251,6	681,0	1,29
500,0	642,9	217,7	807,1	1,29
450,0	642,9	236,5	743,0	1,43
375,0	642,9	312,3	546,0	1,71
500,0	642,8	218,8	812,6	1,29
300,0	642,8	288,8	677,3	2,14
300,0	642,8	271,8	665,8	2,14
450,0	562,5	282,8	599,5	1,25
364,1	562,5	294,5	577,5	1,54
346,0	562,5	389,0	442,3	1,63
300,0	562,5	246,3	690,3	1,88
264,7	562,5	253,8	689,3	2,13
375,0	500,0	285,5	606,3	1,33
375,0	500,0	294,8	589,0	1,33
300,0	500,0	252,8	671,5	1,67
250,0	500,0	400,5	438,3	2,00
346,1	450,0	321,5	547,0	1,30
346,0	450,0	330,7	561,1	1,30
300,0	450,0	404,3	453,8	1,50
281,2	450,0	412,3	411,8	1,60
236,9	375,0	576,0	306,3	1,58

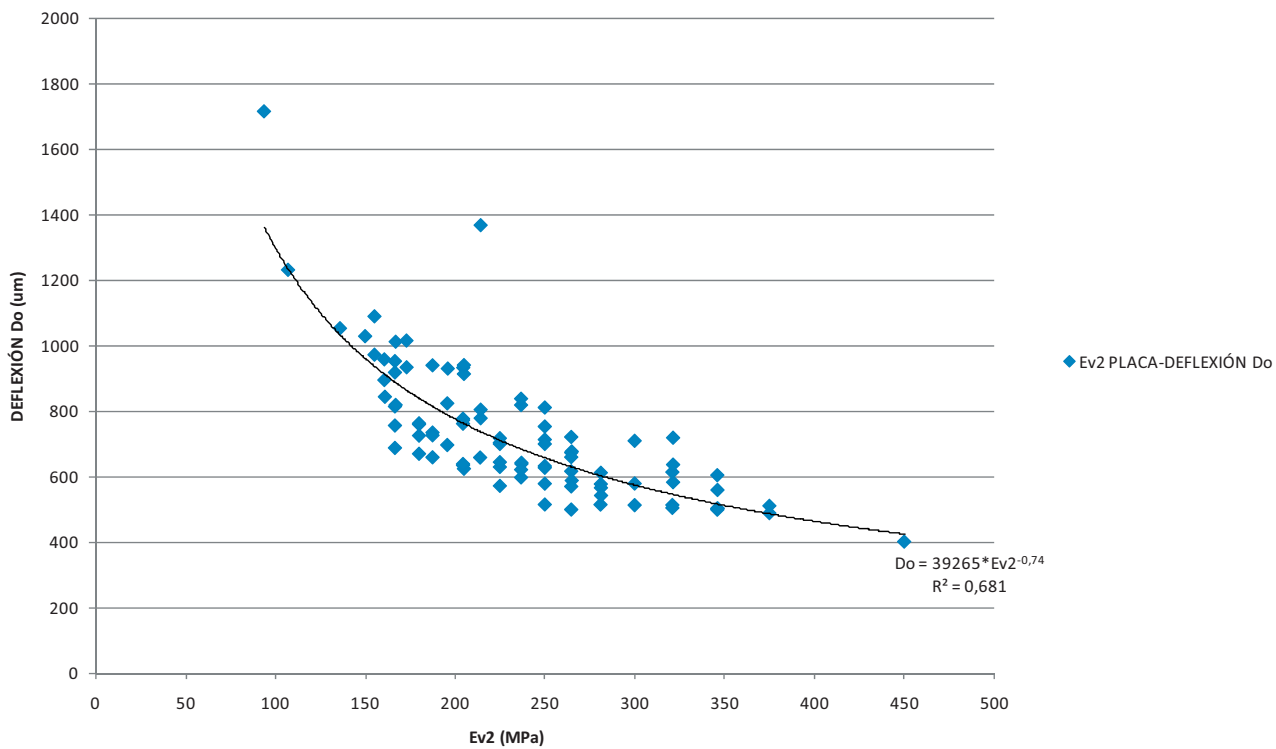
#### B.9.4 Gráficos.

Los gráficos que se adjuntan a continuación recogen la comparativa entre ambos ensayos para cada tipo de material, la ecuación de correlación obtenida y el valor del estadístico  $R^2$ , que nos indica el grado de ajuste del modelo.

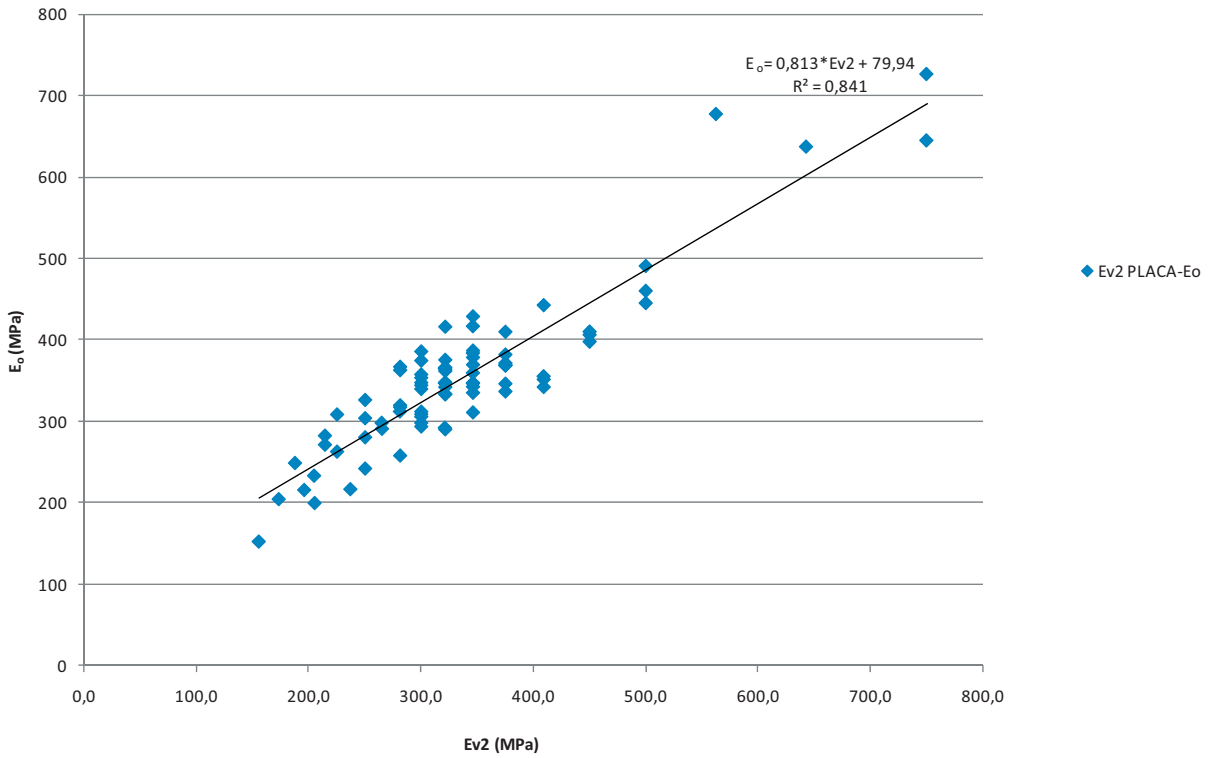
**Ev2 PLACA-Eo SUELO SELECCIONADO**



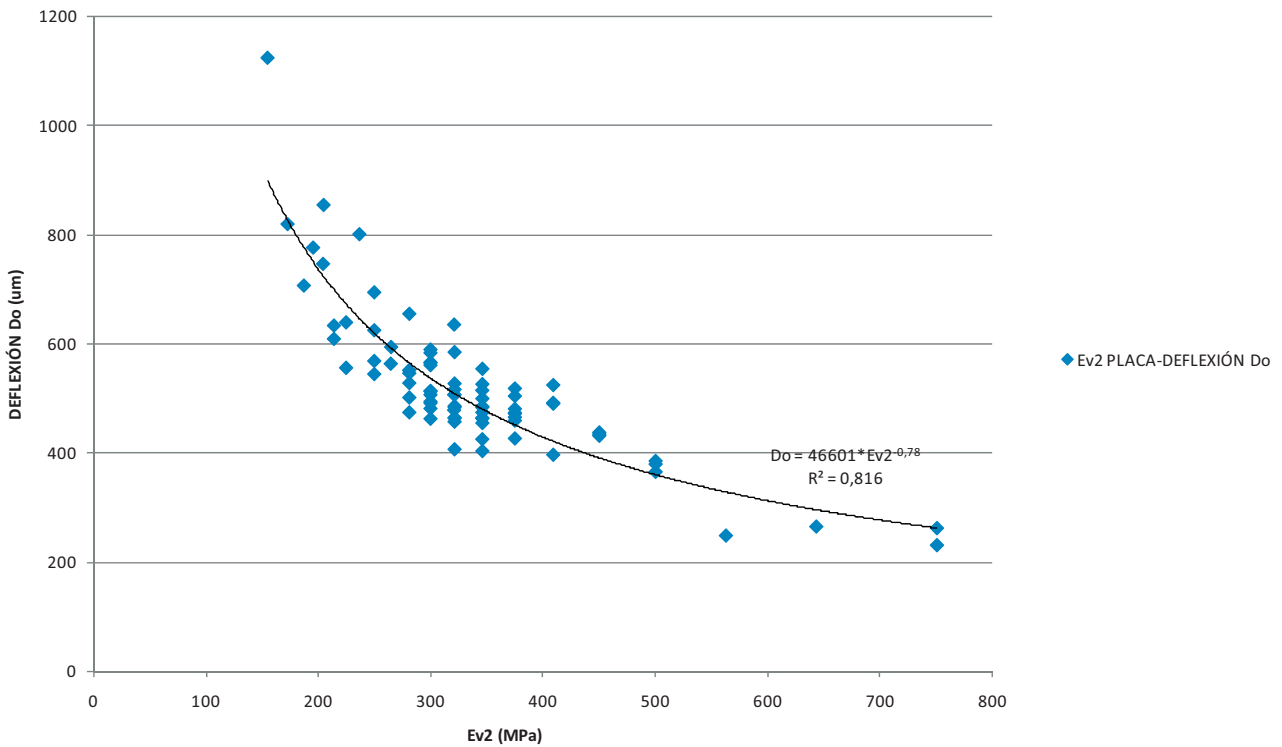
**Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN Do SUELO SELECCIONADO.**



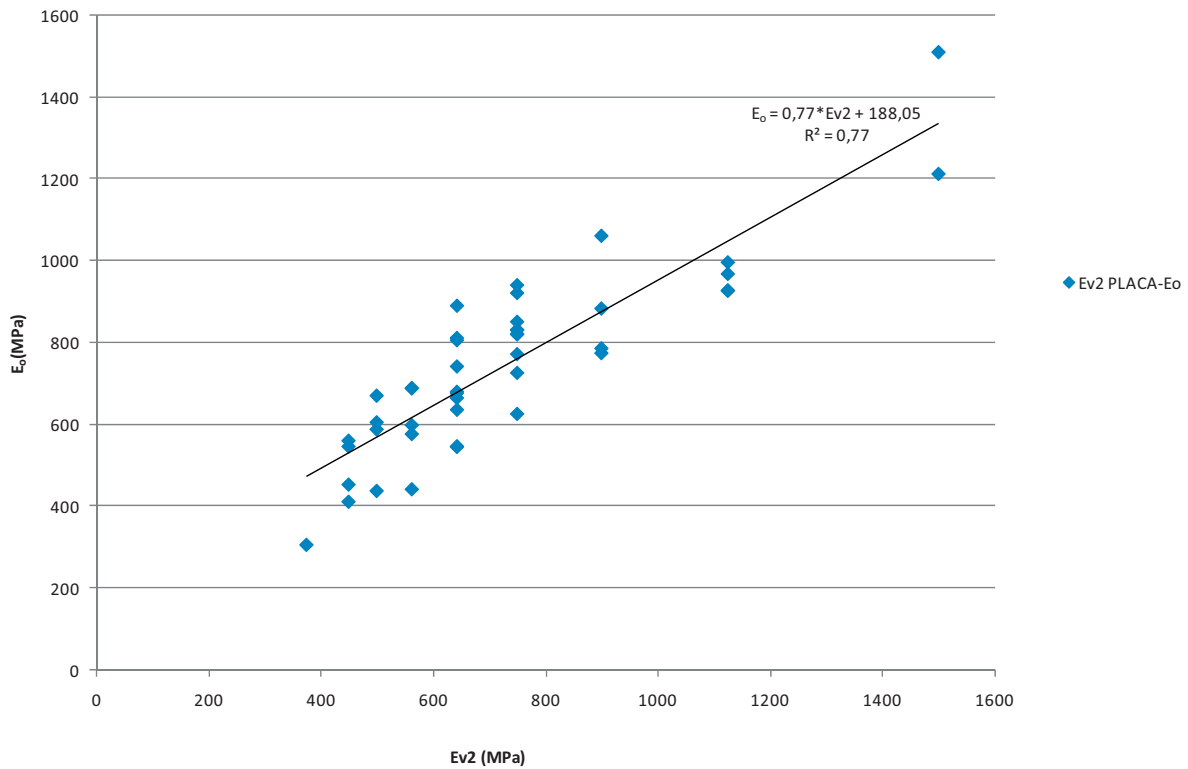
**Ev2 PLACA-Eo ZAHORRA ARTIFICIAL.**



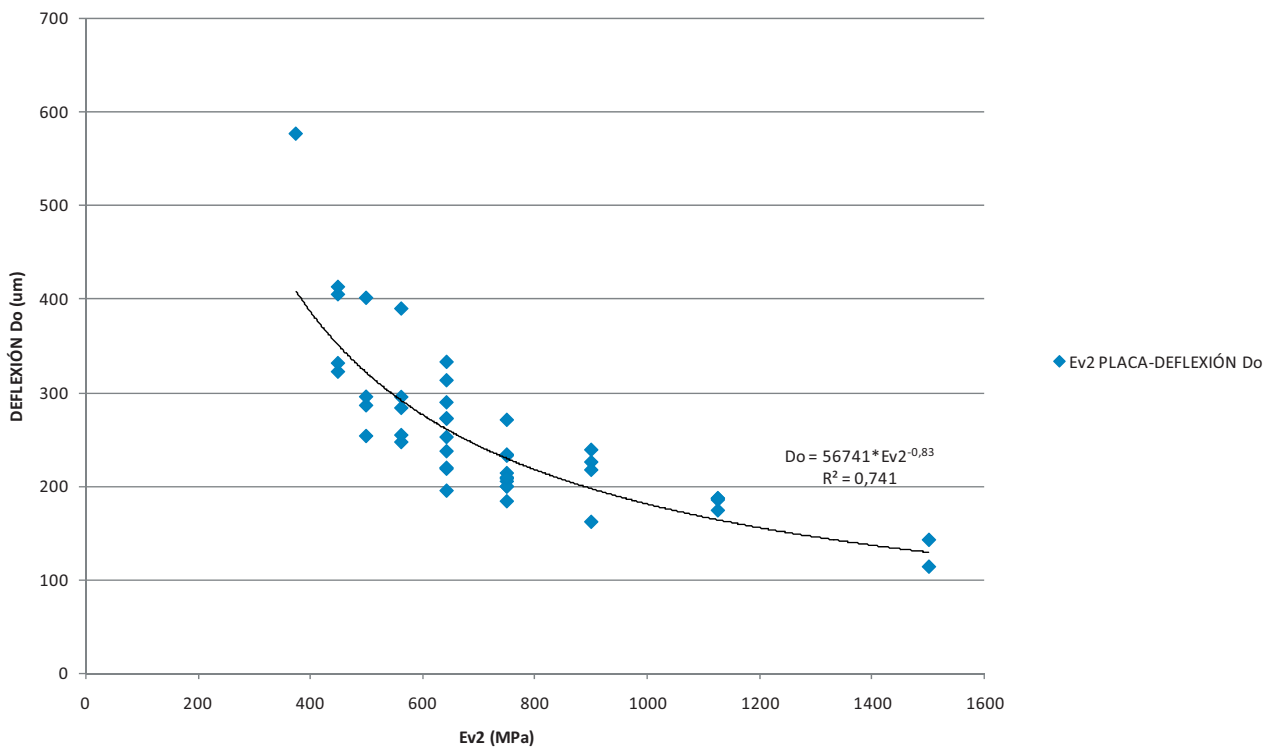
**Ev2 PLACA -DEFLEXIÓN Do ZAHORRA ARTIFICIAL.**



**Ev2 PLACA-Eo SUELO ESTABILIZADO.**

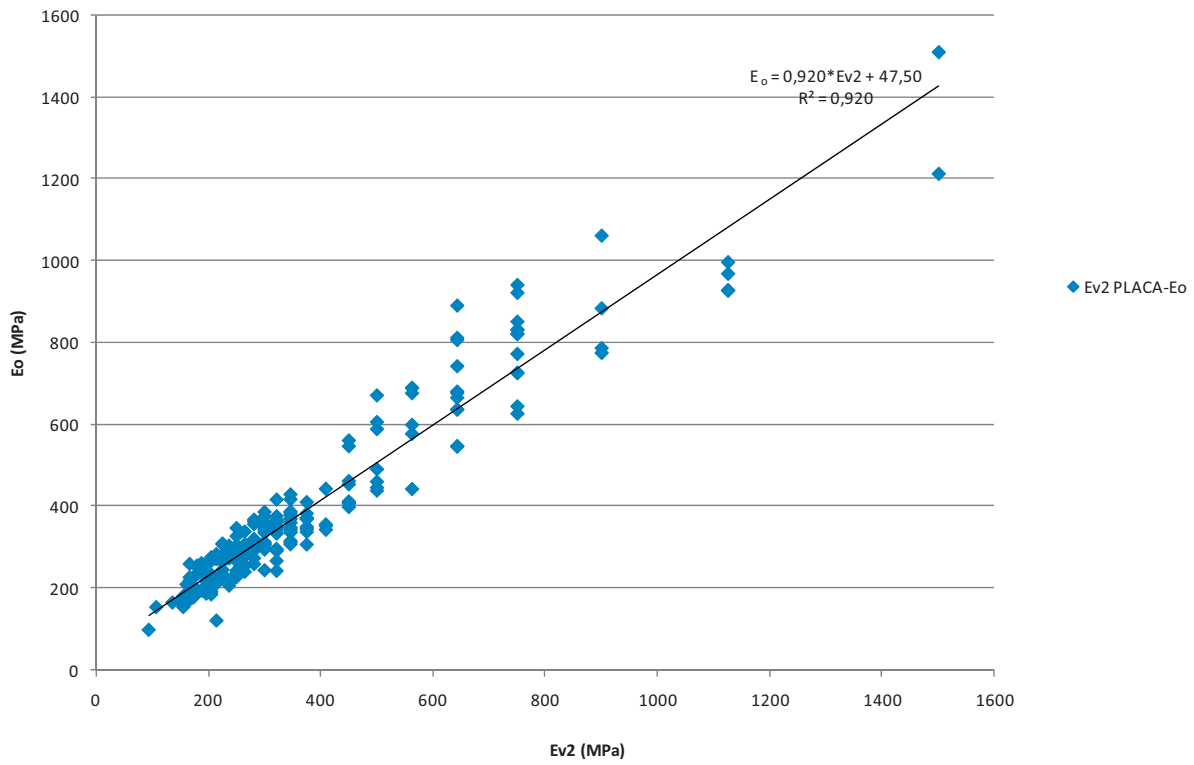


**Ev2 PLACA -DEFLEXIÓN Do SUELO ESTABILIZADO.**

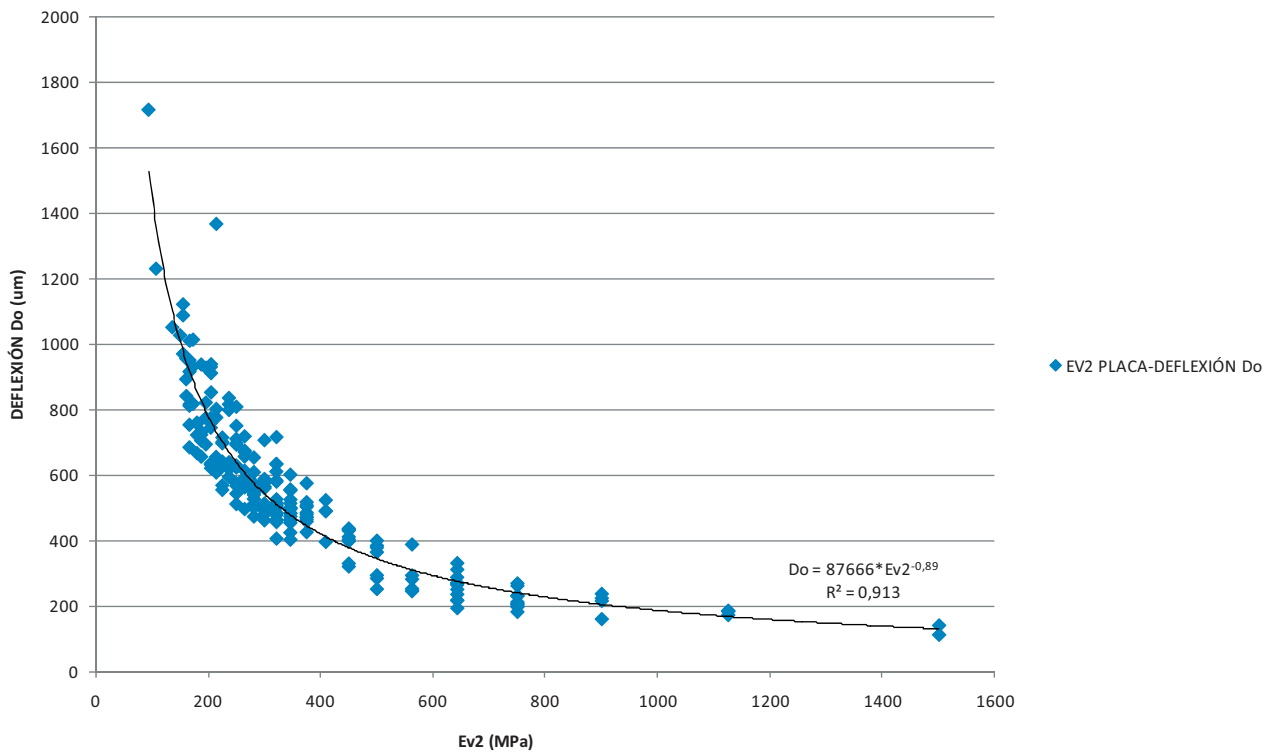




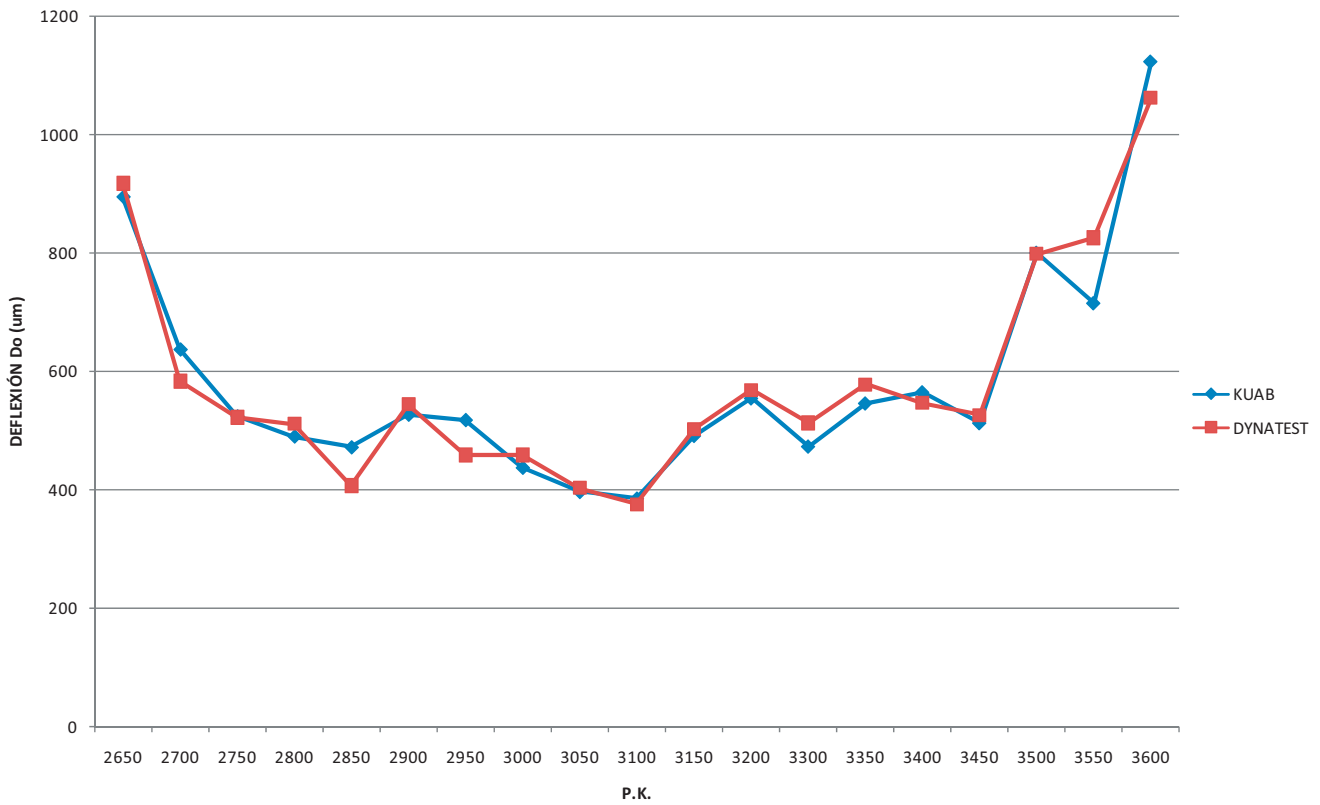
**Ev2 PLACA-Eo DEFLECTÓMETRO GLOBAL.**



**Ev2 PLACA - DEFLEXIÓN Do GLOBAL.**



**CUENCO DEFLEXIONES Do KUAB-DYNATEST.**



**COMPARACIÓN MÓDULOS KUAB-DYNATEST**

